

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Produção de calor com sistema de concentração solar para valorização de resíduos sólidos (CDR)

Tiago José Alexandre Graça

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Dissertação orientada por:
Eng.º João Farinha Mendes
Doutor Pedro Azevedo

2019

Resumo

A transformação de um resíduo em matéria-prima (CDR), pode requerer processos de melhoria das suas características. Para que este resíduo seja aceite como matéria-prima em certas indústrias, tais como as cimenteiras, é necessário a redução de humidade para os valores aceites pelo comprador.

Com a implementação de um sistema de secagem, é possível colocar o CDR, com as características definidas pelo comprador. Para que estes sistemas de secagem, possam reduzir a humidade, é necessário consumir matéria-prima de origem fóssil, o que pode inviabilizar o processo. Para tal, a integração de sistemas de coletores, permite uma redução no consumo de combustíveis fósseis, e futuramente tornar o projeto viável financeiramente. De forma a reduzir ainda mais os custos associados ao combustível, pode ser aproveitada a energia contida nos gases de combustão, para aumentar a temperatura do ar no permutador de calor ar-água.

Neste trabalho, primeiramente, foram avaliadas as necessidades energéticas e de matéria-prima, que cada equipamento de secagem requer, e posteriormente, foram avaliadas as consequências da integração de concentradores solares. Os resultados obtidos através do software TRNSYS, indicam que anualmente o secador STELA requer 9377 MWh secando 97,2% do CDR, e 9517 MWh secando 100% do CDR. Já para o secador TEMA requer 8052 MWh secando 83,8% do CDR, e 8205 MWh secando 86,1% do CDR.

A integração dos concentradores solares, permite uma redução anual de combustíveis-fósseis, entre 25,3% e 49%, dependendo da área implementada, para o secador STELA, e entre 24,8% e 51,2%, também dependendo da área implementada para o secador TEMA.

Em termos financeiros, a integração leva ao aumento dos custos iniciais, que podem implicar um aumento entre 90 % e 252 % para o secador STELA, e entre 60 % e 169 % para o secador TEMA, dependendo do tamanho do campo de coletores. Embora a implementação do campo de coletores implique um aumento de custos iniciais, no fim do tempo de vida considerado, foi possível obter um melhor resultado financeiro para todos cenários com campos de coletores, em comparação com os cenários sem campo de coletores.

O aproveitamento da energia térmica dos gases de combustão permite uma redução de combustível de 3,00 % para o secador STELA e de 4,56 % para o secador TEMA. Ao instalar um campo de coletores e aumentar a sua área, a redução do consumo de combustível varia entre 3,13 % e 3,18 % para o secador STELA e entre 4,55 % e 4,66 % para o secador TEMA. Isto em comparação com o mesmo sistema sem aproveitamento da energia térmica dos gases de combustão.

Palavras-Chave: CDR, secador, energia solar, Calor de processo industrial, avaliação financeira

Abstract

The transformation of waste into raw material (RDF), may require improvement processes of his own characteristics. For this waste to be accepted as raw material in certain industries, like cement industry, it is necessary to reduce the humidity to the values accepted by the buyer.

With the implementation of a drying system, it's possible to put the RDF with the characteristics defined by the buyer. For these drying systems, be able to reduce the humidity, it's necessary to consume fossil fuel, which can turn the process unattractive. For this reason, the integration of a solar systems, allow a reduction in the consumption of fossil fuel, and in the future make the project viable financially. In order to reduce even more the costs associated with fuel, the energy contained in the flue gases can be used to increase the air temperature in the air-to-water heat exchanger.

In this work, first was evaluated the energy and raw material needs of each drying system, afterwards, was evaluated the consequences of the integration of CSP technology. The results obtained through the software TRNSYS, indicates that annually, the STELA dryer requires 9377 MWh 97,2% of the RDF and 9517 MWh drying 100% of the RDF. For the TEMA dryer requires 8052 MWh drying 83,8% of the RDF and 8205 MWh drying 86,1% of the RDF.

With the integration of CSP technology, allows an annual reduction of fossil fuels, between 25,3% and 49%, depending on the area implemented, for the STELA dryer, and between 24,8% and 51,2% depending on the area implemented for the TEMA dryer.

Financially, the integration leads to an increase of the initial costs, which may imply an increase between 90% and 252% for the STELA dryer, and between 60% and 169% for the TEMA dryer, depending on the size of the solar field. Although the implementation of the collector field implies an increase of the initial cost, at the end of the lifecycle considered, it was possible to obtain a better financial result for all scenarios with solar fields, compared to the scenarios without solar fields.

The use of the thermal energy of the flue gases allows a fuel reduction of 3,00 % for the STELA dryers and 4,56 % for the TEMA dryer. By installing a solar field and increasing its area, the fuel consumption reduction ranges from 3,1 % to 3,18 % for the STELA dryer and from 4,55 % to 4,66 % for the TEMA dryer. This compared to the same system without the use of the thermal energy of the flue gases.

Keywords: RDF, dryer, solar energy, industrial process heat, financial evaluation

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Agradecimentos	ix
Lista de Abreviaturas Siglas e Acrónimos	x
Índices	x
Nomenclatura	xi
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Contexto do trabalho	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura do Documento	4
Capítulo 2 - Fundamentos teóricos	5
2.1. Combustíveis derivados de resíduos	5
2.1.1. O que são Combustíveis Derivados de Resíduos?.....	5
2.2. Coletores solares	9
2.2.1. Coletores cilindro-parabólicos	14
2.2.2. Refletor linear de Fresnel	15
2.2.3. Disco parabólico.....	16
2.2.4. Torre	17
2.2.5. Alinhamento do campo solar.....	18
2.3. Processo de secagem	18
2.3.1. Tipos de secadores.....	19
Capítulo 3 - Metodologia	23
3.1. Software.....	24
3.2. Produção de CDR seco	24
3.2.1. Produção de CDR pré-secagem.....	24
3.2.1. Necessidades de secagem.....	27
3.2.3. Balanços	27
3.2.4. Fatores ambientais	31
3.3. Produção de energia (concentradores solares)	34
3.3.1. Cálculos	34
3.4. Produção de energia (sistema auxiliar).....	38
3.4.1. Cálculos	40
3.5. Sistema de controlo	42
3.6. Tubagens e bombas	44

3.7. Armazenamento de CDR	46
3.8. Análise financeira.....	47
3.9. Cenários simulados	49
Capítulo 4 - Resultados	50
4.1. Avaliação dos secadores	50
4.2. Avaliação de armazenamento de CDR.....	51
4.3. Avaliação dos Combustíveis.....	52
4.4. Avaliação dos campos de coletores	55
4.5. Circulação de gases de combustão	59
4.6. Avaliação financeira.....	60
4.6. Avaliação da utilização dos gases de combustão	64
Capítulo 5 - Discussão	66
Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	68
Capítulo 7 - Referências Bibliográficas	70
Capítulo 8 - Apêndices.....	74
A. Cálculos e resultados adicionais.....	74
B. CDR.....	76

Índice de Figuras

Figura 1.1: Fontes de energia primária consumidas em 2015. [2][17].....	1
Figura 1.2: Sectores que consumiram gás natural em 2015. [2].....	1
Figura 1.3: Potencial de integração de solar térmico em processos industriais. [4]	2
Figura 1.4: Variação da média anual do DNI na Europa.	2
Figura 1.5: Energia térmica e fotovoltaica produzida com o recurso solar.	3
Figura 1.6: Consumo de energia primária por sector no mundo. [7]	3
Figura 2.1: Fator de emissão de CO ₂ para diferentes combustíveis. [10]	6
Figura 2.2: Exemplo de um CDR <i>fluff</i> , <i>pellets</i> e briquete. [14]	7
Figura 2.3: Variação ao longo do tempo da utilização do RSU como energia primária.	8
Figura 2.4: Utilização de RSU como fonte de energia primária em 2015 para diferentes países da Europa.	8
Figura 2.5: Temperatura e aplicação dos coletores solares. [23]	10
Figura 2.6: Ilustração dos coletores de tubo de vácuo de fluxo indireto e direto, concentrador parabólico composto, e de placa plana.	11
Figura 2.7: Representação da variação da temperatura ao longo do tempo. [28]	12
Figura 2.8: Localização das SHIP em Portugal. [29]	13
Figura 2.9: Potência instalada, em construção e em desenvolvimento de CSP. [20]	13
Figura 2.10: Modo de operação do cilindro-parabólico. [25]	14
Figura 2.11: Parâmetros dos coletores cilindro-parabólico. [31]	15
Figura 2.12: Modo de operação dos refletores lineares de Fresnel. [25]	16
Figura 2.13: Concentrador secundário com tubo de absorção. [30]	16
Figura 2.14: Modo de operação do refletor de disco parabólico. [25]	17
Figura 2.15: modo de operação da torre. [25]	17
Figura 2.16: Representação da orientação do camp de coletores. [34]	18
Figura 2.17: Secador rotativo indireto. [36]	20
Figura 2.18: Secador rotativo direto. [36]	21
Figura 2.19: Secador vertical e horizontal de agitação. [36]	21
Figura 2.20: Secador de leito fluidizado. [36]	22
Figura 3.1: Representação esquemática do sistema convencional, sem coletores integrados. [3]	23
Figura 3.2: Representação esquemática do sistema com coletores integrados. [3]	24
Figura 3.3: Composição do CDR após trituração e separação. (PET- Politereftalato de etileno; ECAL - Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos; PEAD - Polietileno de Alta Densidade).....	25
Figura 3.4: Variação da humidade base húmida no CDR ao longo do ano.	26
Figura 3.5: Variação da produção de CDR ao longo do ano.	26
Figura 3.6: Exemplos de um secador da TEMA, à esquerda, e de um secador da STELA, à direita.	27
Figura 3.7: Representação esquemática dos fluxos de massa no sistema de secagem.	28
Figura 3.8: Comparação da variação do caudal de CDR entre os equipamentos e o possível de produzir.	31
Figura 3.9: Variação da temperatura ao longo do ano.	32
Figura 3.10: Variação da Humidade relativa ao longo do ano.	32
Figura 3.11: Variação da humidade absoluta na base seca ao longo do ano.	32
Figura 3.12: Variação do consumo de energia do secador STELA com a variação de fatores exteriores.	33
Figura 3.13: Variação do consumo de energia do secador TEMA com a variação de fatores exteriores.	33
Figura 3.14: Coletor cilindro-parabólico NEP polytrough 1800. [42]	34
Figura 3.15: Energia disponível por mês.	35
Figura 3.16: Curva do modificador de ângulo. [42]	35
Figura 3.17: Curva da eficiência com a temperatura. [42]	35
Figura 3.18: Curva de eficiência dos coletores NEP polytrough 1800.	36
Figura 3.19: Representação da distância entre coletores.	37

Figura 3.20: Ilustração da área de coletores no descampado (esquerda), e da área de coletores no telhado (direita).....	37
Figura 3.21: Representação esquemática do campo de coletores no descampado.	38
Figura 3.22: Exemplo de uma caldeira Bosch.	41
Figura 3.23: Variação das produções de energia para as simulações com CS1.....	42
Figura 3.24: Variação das produções de energia para as simulações com CS2.....	43
Figura 3.25: Variação das produções de energia para as simulações com CS3.....	43
Figura 3.26: Variação da condutividade do isolamento com a temperatura.....	44
Figura 3.27: Representação das disposição dos resíduos no armazém.	46
Figura 3.28: Previsão do preço do GN ao longo do tempo.	48
Figura 4.1: Necessidade mensal de energia dos dois equipamentos de secagem.	50
Figura 4.2: Caudal mensal de CDR possível de secar dos equipamentos de secagem.	50
Figura 4.3: Necessidade de energia por unidade de massa para os equipamentos de secagem.	51
Figura 4.4: Estimativa da evolução da produção de biogás.	52
Figura 4.5: Combustível necessário por quantidade de CDR para os equipamentos de secagem.	53
Figura 4.6: Emissões mensais de SO ₂ do biogás para ambos os equipamentos de secagem.....	54
Figura 4.7: Comportamento da quantidade CO ₂ emitido por quantidade de CDR para o secador TEMA.	54
Figura 4.8: Comportamento da quantidade CO ₂ emitido por quantidade de CDR para o secador STELA.	54
Figura 4.9: Quantidade CO ₂ emitido por quantidade de CDR para os dois equipamentos de secagem com o gás natural.	55
Figura 4.10: Variação mensal do consumo de GN para ambos equipamentos de secagem, sem armazenamento de CDR.	56
Figura 4.11: Energia não aproveitada pelos sistemas.	57
Figura 4.12: Variação da energia útil dos campos solares para ambos equipamentos de secagem, com e sem armazenamento de CDR.	57
Figura 4.13: Variação da temperatura média de saída dos campos solares, para o equipamento de secagem TEMA.	59
Figura 4.14: Variação da temperatura média de saída dos campos solares, para o equipamento de secagem STELA.	59
Figura 4.15: Temperatura média de entrada do ar com os gases de combustão no permutador.....	60
Figura 4.16: Evolução do VAL para as simulações sem armazenamento, com 0% de variação no preço do combustível.....	62
Figura 4.17: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com 0% de variação no preço do combustível.....	63
Figura 4.18: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com 10% de variação no preço do combustível.....	63
Figura 4.19: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com -10% de variação no preço do combustível.....	64
Figura 4.20: Aumento da variação média da humidade (base seca), que entra no secador com fases de combustão.	65

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação das características do CDR com outros combustíveis sólidos. [10].....	5
Tabela 2.2: Quantitativos de CDR e material para CDR produzido (toneladas). [11][15]	7
Tabela 2.3: Produção de resíduos urbanos (10^3 toneladas). [15]	9
Tabela 2.4: Destinos do CDR produzido (toneladas). [11]	9
Tabela 2.5: Resumo das características dos coletores planos. [24].....	10
Tabela 2.6: Resumo das características dos coletores concentradores. [26][27]	11
Tabela 3.1: Dados relativos ao horário de trabalho.	25
Tabela 3.2: Dados mensais do CDR.	26
Tabela 3.3: Resultados obtidos das condições nominais para o secador TEMA.	30
Tabela 3.4: Resultados obtidos das condições nominais para o secador STELA.	30
Tabela 3.5: Dados relativos ao campo solar.	37
Tabela 3.6: Características do biogás e do gás natural.	38
Tabela 3.7: Comparação de algumas características dos processos de upgrading. [49][50]	39
Tabela 3.8: DNI a partir de onde o sistema auxiliar tem produção mínima, e o campo solar produção máxima.	43
Tabela 3.9: Dados necessários para as tubagens.	44
Tabela 3.10: Dados para determinação do coeficiente de convecção, e o seu resultado.	46
Tabela 3.11: Valores de CAPEX e OPEX para os diferentes componentes.	47
Tabela 3.12: Preço de venda do CDR.	49
Tabela 3.13: Resumo das variáveis em estudo nas diferentes simulações.	49
Tabela 4.1: Valores referentes ao armazenamento de CDR.	51
Tabela 4.2: Quantidade de CDR seco em relação ao CDR disponível.	51
Tabela 4.3: Eficiência das diferentes simulações.	52
Tabela 4.4: Comparação do biogás com o biometano.	52
Tabela 4.5: Indicadores anuais das diferentes simulações.	55
Tabela 4.6: Dados relativos aos campos de coletores.	55
Tabela 4.7: Dados anuais referentes ao fator solar dos campos de coletores.	56
Tabela 4.8: Energia anual não aproveitada pelos sistemas.	57
Tabela 4.9: Redução do consumo de combustíveis para as diferentes simulações.	58
Tabela 4.10: Redução das emissões de poluentes para as diferentes simulações.	58
Tabela 4.11: Consumo anual de gás natural.	60
Tabela 4.12: Dados relativos ao investimento.	61
Tabela 4.13: Investimento efetivo necessário com combustível por quantidade de CDR seco desde 2018 até 2042.	61
Tabela 4.14: Receita efetiva da venda de CDR desde 2018 até 2042.	61
Tabela 4.15: Investimento efetivo necessário para a deposição do resíduo não seco em aterro desde 2018 até 2042.	62
Tabela 4.16: Valor da TIR para as diferentes simulações.	64
Tabela 4.17: VAL sem aproveitamento da energia dos gases de combustão, e acréscimo que o aproveitamento dos gases de combustão têm no VAL.	64
Tabela 4.18: Valor da TIR nas simulações com recirculação dos gases de combustão.	65
Tabela 8.1: Resultados do balanço de massa e de energia para as condições nominais.	74
Tabela 8.2: Sistema de classificação para o CDR (NP 4486:2008).	76
Tabela 8.3: Enquadramento Geral relativo à produção e utilização de CDR.	77

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao meu orientador Eng.º Farinha Mendes, e coorientador Doutor Pedro Azevedo, por me darem a oportunidade de realizar esta dissertação sob a sua orientação, agradecer por estarem sempre disponíveis, pela ajuda, e pela paciência que tiveram comigo, pela partilha de conhecimentos, e pelas revisões feitas ao longo do trabalho.

Agradeço ao Eng.º João Cardoso, pela sua disponibilidade, e conhecimentos sobre a aplicação TRNSYS.

Quero a agradecer à empresa que se disponibilizou para o estudo, GESAMB, principalmente na pessoa do Eng.º Ivo Dias, por disponibilizar a informação que foi necessária ao longo do trabalho.

Ao colega Tiago Eusébio que também me ajudou em diferentes questões do trabalho.

Quero deixar um grande obrigado aos meus pais, por todo o apoio, sacrifício e paciência que tiveram comigo. Sem eles, nada disto seria possível.

E por fim queria a agradecer a todos os meus amigos, que me deram apoio moral, e às pessoas que conheci no LNEG, pela ajuda e simpatia.

Lista de Abreviaturas Siglas e Acrónimos

PERSU	□	Plano estratégico de resíduos sólidos urbanos
SGRU	□	Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos
NP	□	Norma Portuguesa
DL	□	Decreto-Lei
R1	□	Incineração em terra
D10	□	Utilização principal como combustível ou outros meios de produção de energia
n.a.	□	Não aplicável
CAPEX	□	Capital Expenditure
OPEX	□	Operational Expenditure
VAL	□	Valor atual líquido
TIR	□	Taxa interna de retorno
CPC	□	Concentrador parabólico composto
CS	□	Campo coletores
SHIP	□	Solar Heat for Industrial Processes

Índices

Out	□	Saída
in	□	Entrada
vap	□	Vapor
H ₂ O	□	Água
bh	□	Base húmida
gc	□	Gases de combustão
amb	□	Ambiente
max	□	Máximo
ar	□	ar
Ar p	□	Ar no permutador
CDR	□	CDR
ref	□	referência
fg	□	
bh	□	Base húmida
teste	□	teste
fuel	□	Combustível
mix	□	mistura
e	□	externo
i	□	interno
s	□	isolamento

Nomenclatura

\dot{m}	[kg/s]	Caudal de massa
Q	[kW]	Quantidade de energia
C_p	[kJ/kg.K]	Calor específico
w	[kg/ kg]	Humidade
h_{fg}	[kJ/kg]	Diferença de entalpia de vapor saturado e líquido saturado
PCI	[kJ/kg]	Poder calorífico inferior
%E	[%]	Percentagem de energia
Q_c	[kW]	Energia produzida pelos concentradores solares
A_c	[m ²]	Área de abertura do coletor
$F_R(\tau\alpha)_n$	[]	Eficiência com que a radiação é absorvida pelo coletor e removida pelo fluxo.
G	[W/m ²]	Irradiância no plano do coletor
DNI	[kJ/hr.m ²]	Quantidade de radiação direta incidente no coletor.
I_t	[kJ/hr.m ²]	Quantidade de radiação solar incidente na área do coletor.
$F_R U_L$	[]	Razão das perdas do coletor.
η_0	[]	Rendimento ótico.
a_1 e a_2	[W/K.m ²]	Coeficientes globais de perdas.
\dot{g}_{test}	[kg/hr]	Caudal no coletor em condições de teste.
$F'U_L$	[]	
N_{serie}	[]	Número de coletores em série.
$A_{abertura}$	[m ²]	Área de abertura dos coletores (Área do refletor).
$N_{paralelo}$	[]	Número de coletores em paralelo.
IAM	[0;1]	Modificador de ângulo incidente.
C	[]	Rácio de concentração.
T	[°C]	Temperatura.
Q_{desp}	[kW]	Quantidade de energia desperdiçada pelos coletores.
I_t	[€]	Custo de investimento no ano t
$R_{L,t}$	[€]	Receita líquida no ano t
R	[€]	Taxa de atualização/ depreciação do capital
t	[Anos]	Tempo de vida
MM	[g/mol]	Massa molar
$\frac{v}{v}$	[]	Percentagem em volume do composto
q	[W/m]	Perdas térmicas por condução
D	[m]	Diâmetro
h_s	[W/m ² .K]	Coeficiente de transferência de calor do isolamento
k	[W/m.K]	Condutividade do isolamento
ρ	[kg/m ³]	Massa volúmica do ar
g	[m/s ²]	Aceleração da gravidade
β	[K ⁻¹]	Coeficiente de expansão do ar
μ	[Ns/m ²]	Viscosidade do ar
Pr	[]	Número de Prandtl

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Contexto do trabalho

Num mundo em que a obtenção de energia ainda é dominada por combustíveis fósseis, o uso de tecnologias de fontes renováveis tem vindo a aumentar. Devido a problemas ambientais e económicos, os governos têm criado metas, leis e incentivos para o uso de fontes de energia renovável. Devido ao aumento da procura por este tipo de tecnologias, a sua diversidade aumentou e os seus custos reduziram.

Em Portugal, todas as instalações com consumo igual ou superior a 500 tep/ano, têm de estar registadas no SGIE. No final de 2016 existiam 1100 instalações abrangidas por este sistema [1][14], que obriga as empresas a aumentarem a sua eficiência energética. Para tal as indústrias devem adotar técnicas ou equipamentos mais eficientes, bem como utilizar combustíveis menos poluentes, ou usar fontes renováveis como substituto de combustível na produção de energia térmica. Na indústria, o consumo de energia não passa apenas pela energia elétrica, vários processos requerem energia térmica, que pode ser obtida sem o uso de eletricidade ou combustíveis fósseis. As temperaturas necessárias em processo industrial podem ir desde as temperaturas baixas ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) às elevadas ($T > 250\text{ }^{\circ}\text{C}$). O uso de energia solar térmica, tem a capacidade de se adaptar a diferentes processos, podendo alcançar temperaturas baixas ou elevadas, e também pode resolver vários problemas como a redução de emissões e redução de custos a médio e longo prazo.

Em Portugal, o consumo de energia em 2015 foi de 22 059 570 tep [2], dos quais 18% foi de gás natural, sendo que desses 18%, 69% foi utilizado pela indústria. Através da Figura 1.1 e da Figura 1.2, é possível observar as diferentes fontes de energia primária, e os sectores que consumiram o gás natural em 2015 para Portugal.

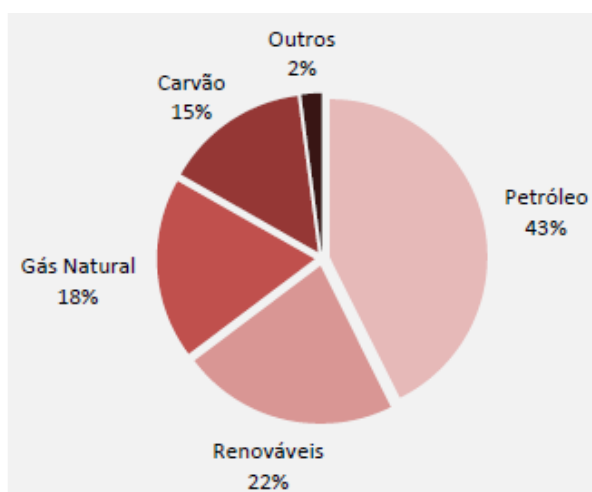


Figura 1.1: Fontes de energia primária consumidas em 2015. [2][17]

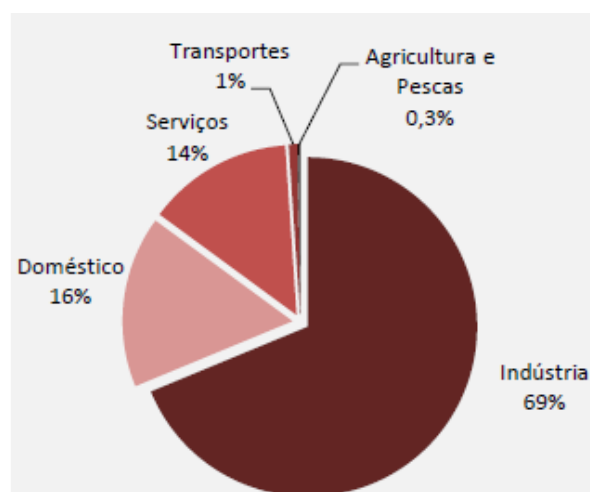


Figura 1.2: Sectores que consumiram gás natural em 2015. [2]

Existe um grande leque no tipo de indústrias em que se pode usar este tipo de tecnologias tais como as indústrias extrativas, indústrias de papel e celulose, indústrias alimentares, bebidas, tabaco, produção de máquinas e de transportes e na indústria química e têxtil, onde pode-se realizar diferentes funções como, secar, lavar, pasteurizar, esterilizar, cozinhar, tingir, branquear, pré-aquecer, entre outras[44]. [3]

Foi realizado um estudo, sobre o potencial da integração de solar térmico em processos industriais, para Portugal e Espanha. Esse estudo indica que em Portugal existe um potencial de 4,4 %, e nos dois países

a indústria alimentar e a de bebidas são as com mais potencial[37] [4]. A Figura 1.3, mostra o potencial da integração das tecnologias solares térmicas na indústria.

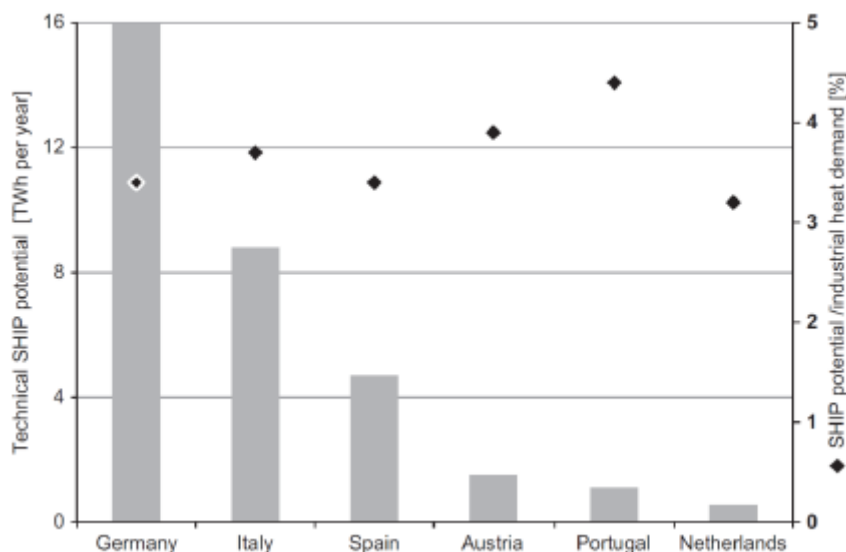


Figura 1.3: Potencial de integração de solar térmico em processos industriais. [4]

Portugal é um dos países da Europa com mais disponibilidade do recurso solar, mas não é o que tem mais aproveitamento de energia solar. Através da Figura 1.4, é possível observar o DNI médio anual na Europa. Uma vez que a tecnologia de concentração solar só aproveita a radiação direta, o DNI torna-se mais relevante em relação à irradiância global que inclui a difusa. Na Figura 1.5, é possível observar a produção de energia térmica e fotovoltaica com o uso do recurso solar nos diferentes países da Europa. Esta figura foi construída com base nos dados disponibilizados pelo Eurostat. [5]

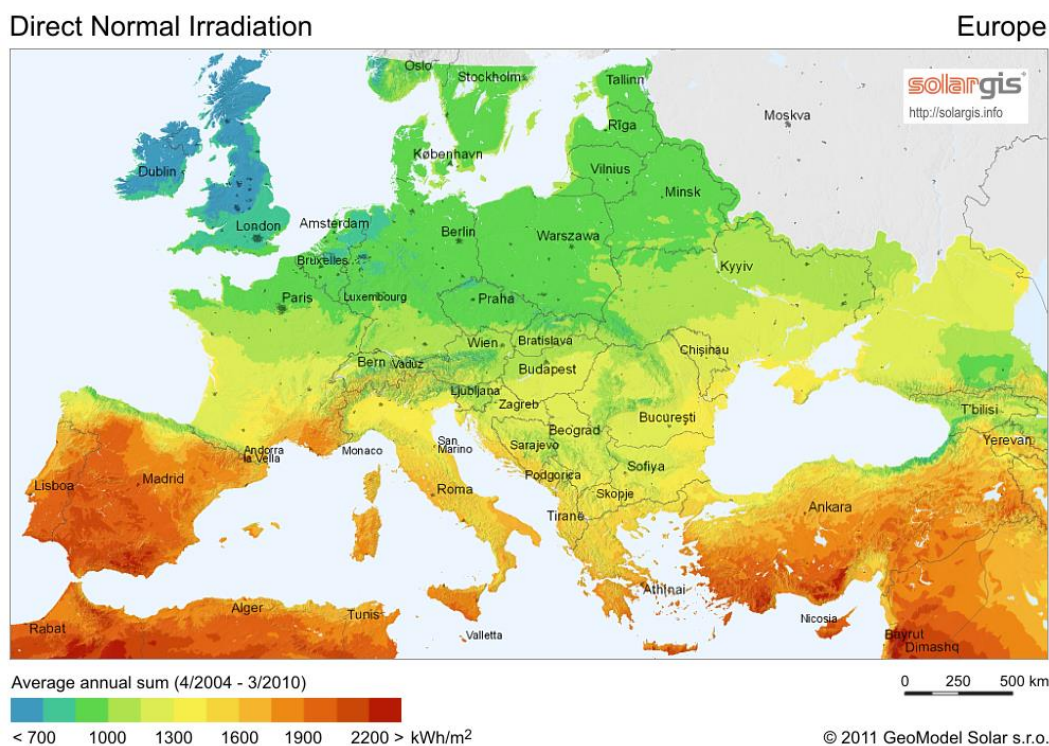


Figura 1.4: Variação da média anual do DNI na Europa.

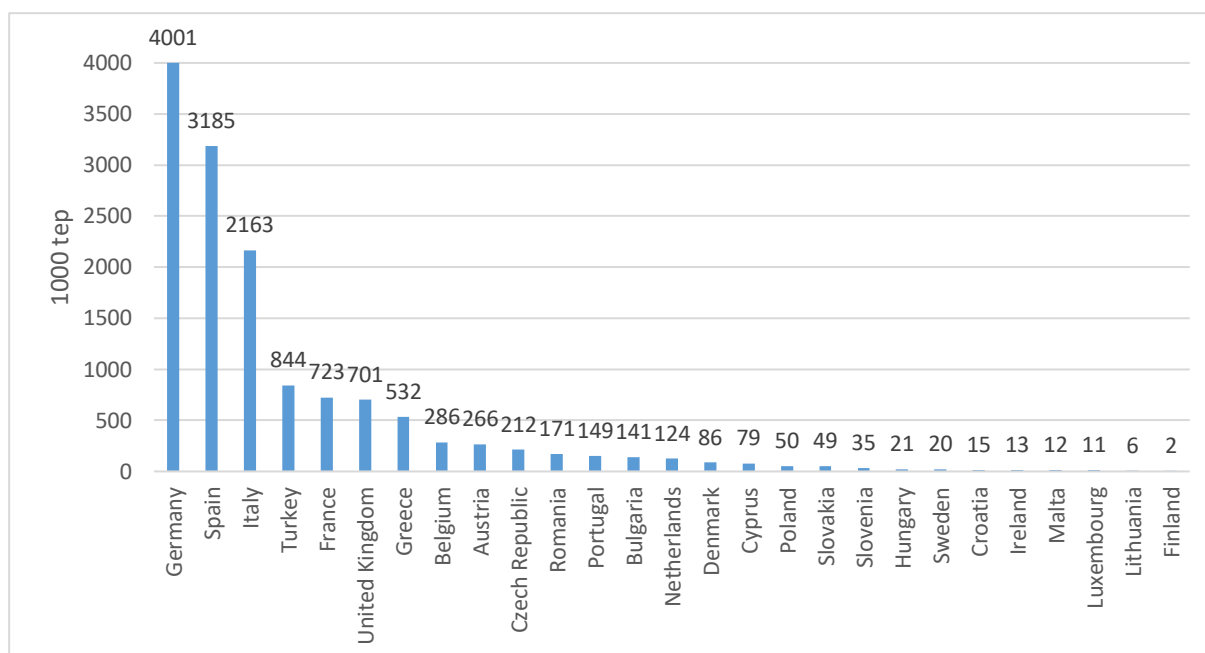


Figura 1.5: Energia térmica e fotovoltaica produzida com o recurso solar.

Embora existam dados relativos ao aproveitamento de energia solar para produzir energia térmica, esses dados são referentes ao sector doméstico, serviços e Estado. O PNAER 2020, estabelecido pela Resolução de conselho de Ministros n.º 20/2013, vem estabelecer objetivos e metas de energias renováveis para a eletricidade, transportes, aquecimento e arrefecimento. No caso do CSP, o PNAER vai reavaliar os objetivos associados a este tipo de centrais. O PNAER não faz nenhuma referência direta ao CDR, embora refira a diversificação das fontes de energia primária. [6]

Através da Figura 1.6, é possível observar que no mundo, a indústria é o sector que requer mais energia com 32 %, seguido do sector dos transportes. Desses 32 % pertencentes à indústria, 74 % do consumo é energia térmica, onde podem ser integrados diferentes tecnologias de coletores solares.

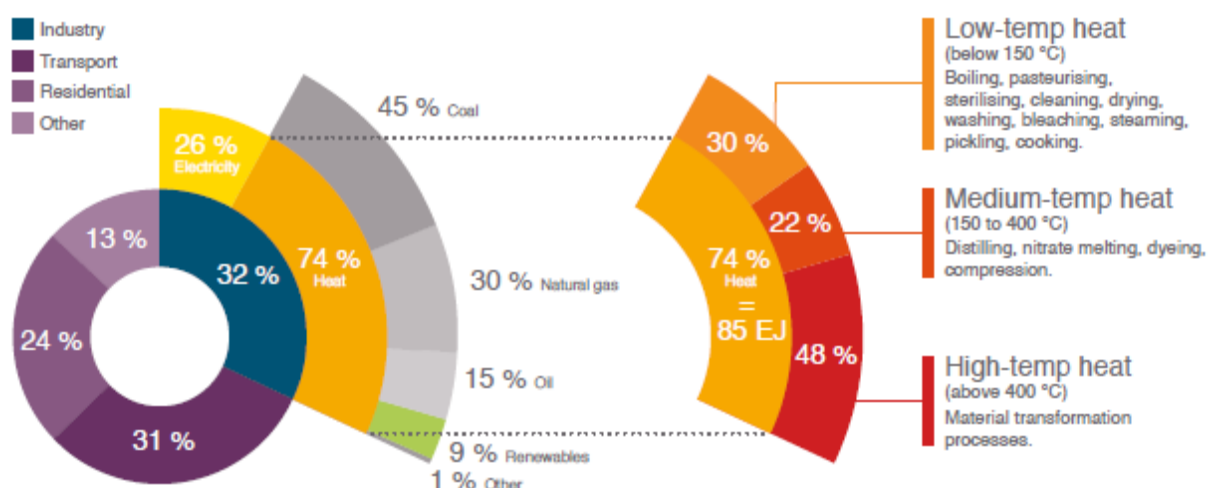


Figura 1.6: Consumo de energia primária por sector no mundo. [7]

De acordo com o relatório do Solar Payback [7], estão instalados mais de 400 000 m² de coletores e áreas espelhadas, sendo que os três sectores industriais com mais integração de tecnologias solares térmicas são o sector dos alimentos e bebidas, seguido do sector da maquinaria, e por fim o sector têxtil.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho, é a realização de um estudo de viabilidade técnico-financeira para a implementação de um sistema solar de concentração que forneça energia térmica a um sistema de secagem, numa empresa responsável pela gestão de resíduos no distrito de Évora. Para tal foi necessário determinar as necessidades de energia térmica do processo de secagem e determinar através do software TRNSYS, se o campo solar tem capacidade para dar resposta às necessidades.

1.3. Estrutura do Documento

Este documento está dividido em 7 capítulos, com várias subdivisões.

No capítulo 1, pretende-se introduzir o tema em estudo, resumindo os diferentes temas em estudo.

No capítulo 2, serão abordados o CDR e a sua situação em Portugal, as diferentes tecnologias para a produção de energia térmica, dando ênfase às mais significativas para o estudo em si, bem como uma descrição do processo de secagem e funcionamento de alguns equipamentos de secagem que podem ser usados.

No capítulo 3, será apresentada a metodologia usada. As ferramentas, dados, cálculos, e os equipamentos necessários para avaliação do sistema de secagem.

No capítulo 4, apresentaremos os diferentes resultados técnicos e financeiros das simulações realizadas.

No capítulo 5, são discutidos os diferentes resultados das simulações.

No capítulo 6, serão enunciadas todas as conclusões possíveis de retirar referentes às simulações efetuadas.

No capítulo 7, enunciamos as referências bibliográficas.

No capítulo 8, é enunciado cálculos e resultados adicionais, bem como uma tabela de classificação e legislação aplicada ao CDR.

Capítulo 2 - Fundamentos teóricos

2.1. Combustíveis derivados de resíduos

2.1.1. O que são Combustíveis Derivados de Resíduos?

A definição de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) segue no Despacho n.º 21295/2009, de 22 de Setembro, e define que os CDR são “combustíveis preparados a partir de resíduos não perigosos, cuja utilização visa a recuperação de energia em unidades de incineração ou de co-incineração reguladas pela legislação ambiental”. [8]

Os CDR estão classificados na Lista Europeia de Resíduos (LER), com o código 19 12 10 - Resíduos combustíveis (combustíveis derivados de resíduos), que estão na subsecção de Resíduos do tratamento mecânico de resíduos. [9][10]

Este tipo de valorização de resíduos é aceite pelas indústrias que dependem de combustíveis fósseis, e que podem utilizar os CDR em processos de combustão, pois permite valorizar os custos associados. Mas só o é, se o resíduo for processado de acordo com as especificações da indústria, sendo por vezes necessário realizar tratamentos prévios para maximizar o poder calorífico do resíduo, ou limitar a humidade, pois quanto maior a sua presença no CDR, maior conteúdo energético do combustível será utilizado para aquecer e vaporizar água, restando menos conteúdo energético para a produção de calor na combustão, reduzindo, assim, o poder calorífico efetivo do CDR. Também pode ser necessário retirar constituintes objeto de legislação específica relativa à sua emissão ou neutralização, como por exemplo alguns metais, o cloro ou fósforo. Através da Tabela 2.1, é possível observar algumas das características do CDR e outros combustíveis sólidos.

Tabela 2.1: Comparação das características do CDR com outros combustíveis sólidos. [10]

Parâmetro ^{a)}	Carvão (Antracite)	Aparas Pinheiro	Casca de Eucalipto	CDR
PCI (MJ/kg)	33,17	16,99	14,90	18,06
Humidade (% m/m)	1,90	9,3	12,00	18,00
Cinzas (% m/m)	2,80	0,30	4,20	15,00
Cloro (% m/m)	0,08	0,01	0,23	0,91
Enxofre (% m/m)	0,79	0,02	0,04	0,14

^{a)} Base húmida com cinzas

A humidade e a presença de constituintes com tratamento específico devido a legislação ambiental, não são os únicos fatores que influenciam um CDR economicamente viável e de boa qualidade, uma vez que os CDR são uma mistura de uma grande variedade de resíduos com diferentes poderes caloríficos. Assim, é necessário que a mistura de CDR seja tão homogênea quanto possível, para reduzir as variações do poder calorífico ao longo do processo de combustão. Embora o CDR tenha um PCI inferior ao carvão, o carbono no CDR, não é todo de origem fóssil ao contrário do carvão. Isso pode ter vantagens para a produção de eletricidade e licenças de emissão de CO₂. Através da Figura 2.1, é possível observar as emissões de CO₂ dos diferentes combustíveis.

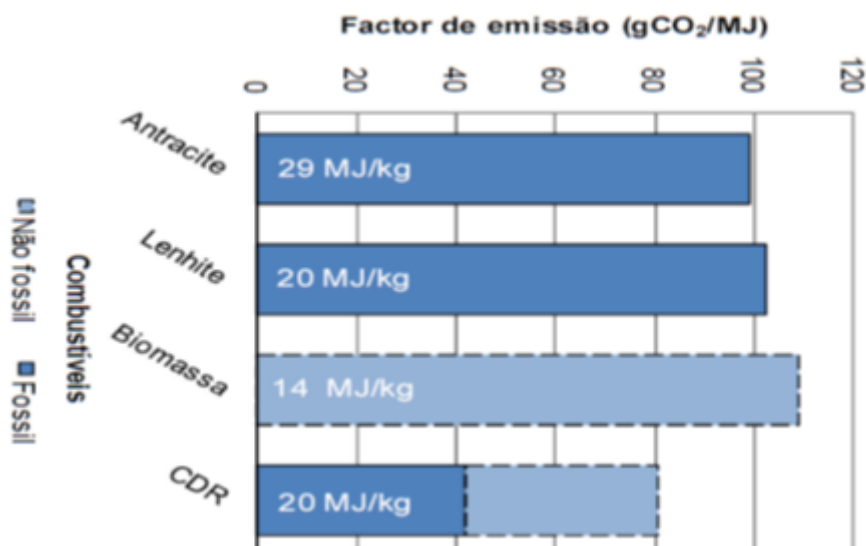


Figura 2.1: Fator de emissão de CO₂ para diferentes combustíveis. [10]

Legislação do CDR

O Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU II) para 2007-2016, teve um papel importante para os CDR, pois através deste Plano estratégico, foi possível introduzir o CDR na estratégia de gestão de resíduos, pelo Despacho n.º 21295/2009, de 26 de Agosto.[5]

O despacho estabelece a estratégia para os combustíveis derivados dos resíduos entre 2009 e 2020, e apresenta o conjunto de legislação a que os CDR estão sujeitos, que vai desde a gestão, classificação e transporte até ao seu ponto de utilização. [8]

A NP 4486:2008, enquadra os requisitos de natureza técnica, ambiental e económica do CDR, e estabelece um conjunto de regras de conformidade para a classificação do CDR em Portugal.

De acordo com a norma, o CDR tem três parâmetros importantes, que são o poder calorífico inferior, o teor de cloro e o teor de mercúrio. Cada parâmetro é dividido em cinco classes e quanto maior for a quantidade do parâmetro, maior é a sua classe. [9]

Estes três parâmetros não são os únicos necessários para a classificação do CDR, pois é uma descrição simplificada e não revela a verdadeira qualidade do resíduo. Para obter uma melhor caracterização, é necessário especificar mais parâmetros como o cobre ou o níquel.

Um produtor de CDR apenas pode garantir qualidade de produto se todos os parâmetros obrigatórios da NP 4486 forem caracterizados, caso contrário não pode garantir qualidade do seu produto e apenas caracteriza os parâmetros que a indústria recetora exigir. Uma vez que nenhuma legislação obriga ao cumprimento da NP 4486, o seu cumprimento passa apenas, por quem queira obter a sua certificação.

O Decreto-Lei nº 85/2005, de 28 de Abril, estabelece o regime legal de incineração e co-incineração de resíduos. Este é também o documento que regula a utilização do CDR como combustível nos processos de incineração e co-incineração. Já para a produção de CDR, o Decreto-Lei 178/2006, de 5 de Setembro, estabelece o licenciamento para a sua produção. [8]

Estratégia para o CDR em Portugal

Atualmente em Portugal, o PERSU 2020 para 2014-2020, é o documento que está em vigor para a gestão de resíduos. No novo documento, o CDR faz parte dos planos para a redução da deposição de resíduos em aterros, e vai contribuir para outras estratégias e planos nacionais ao substituírem os combustíveis fósseis. [12]

Algumas das medidas para a redução da deposição de resíduos em aterro passam pelo aumento da produção de CDR. As medidas que envolvem o CDR são os reforços das linhas de tratamento mecânico e biológico que produzem o CDR; avaliações com sector industrial e Sistemas de Gestão de Resíduos (SGRU), a viabilidade de instalar unidades de cogeração com recurso a CDR para fornecimento de eletricidade e calor; contratualização do escoamento renumerado dos CDR; desenvolvimento de ações para a construção de unidades de preparação e secagem de CDR; realização de acordos com a indústria cimenteira para garantir escoamento de CDR; remoção do estatuto do CDR como resíduo para facilitar o escoamento e aumentar o seu valor; e desenvolvimento de mercados de resíduos por plataformas eletrónicas; e a criação de mercados intermédio de preparação e escoamento de CDR. [11][12]

Produção de CDR

O CDR pode ter diferentes resíduos dependendo da origem, mas todos são sujeitos a um tratamento mecânico ou tratamento mecânico-biológico, para retirar a fração reciclável e redução da granulometria. A redução da granulometria permite aumentar a homogeneidade e facilitar o transporte e armazenamento. O CDR de acordo com a sua forma final pode ser classificado de *fluff*, que é um material solto com capacidade de ser transportado pelo ar; *pellets*, que é material aglomerado solto em cubos, disco ou cilindro, com diâmetro inferior a 25 mm, geralmente; ou *briquette*, que são aglomerados soltos em bloco ou cilindro, com diâmetro geralmente superior a 25 mm [13][14]. A Figura 2.2, ilustra os três tipos de CDR.



Figura 2.2: Exemplo de um CDR *fluff*, *pellets* e *briquette*. [14]

A primeira produção registada de CDR em Portugal, foi em 2011. Na Tabela 2.2 é possível observar o aumento da produção de CDR, devido ao aumento de infraestruturas com capacidade de produzir CDR [15]. Relativamente a 2016 existe um decréscimo, porque o CDR produzido foi encaminhado para as unidades de produção de CDR existente nos SGRU [11]. E é possível observar a estimativa para 2020.

Tabela 2.2: Quantitativos de CDR e material para CDR produzido (toneladas). [11][15]

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2020
Triagem	-	-	120	757	1 308	0	-
Centrais de TM	-	5 709	11 484	69 996	33 750	21 042	-
Centrais de TMB	5 412	27 153	20 498	34 198	72 564	467	-
Unidade de produção de CDR	-	-	-	-	6 943	0	-
Total	5 412	32 862	32 102	104 951	114 566	21 509	490 000

Os CDR podem ser produzidos de diversas fontes. Podem ser produzidos de lamas desidratadas de ETAR, resíduos de biomassa e resíduos urbanos. Os resíduos industriais com exceção dos perigosos também podem ser utilizados, como por exemplo plástico, papel, têxteis, pneus, resíduos florestais e agrícolas, entre outros. A Figura 2.3, mostra a variação ao longo do tempo da utilização do RSU como fonte de energia primária, em Portugal. Este gráfico foi obtido através dos dados de [5].

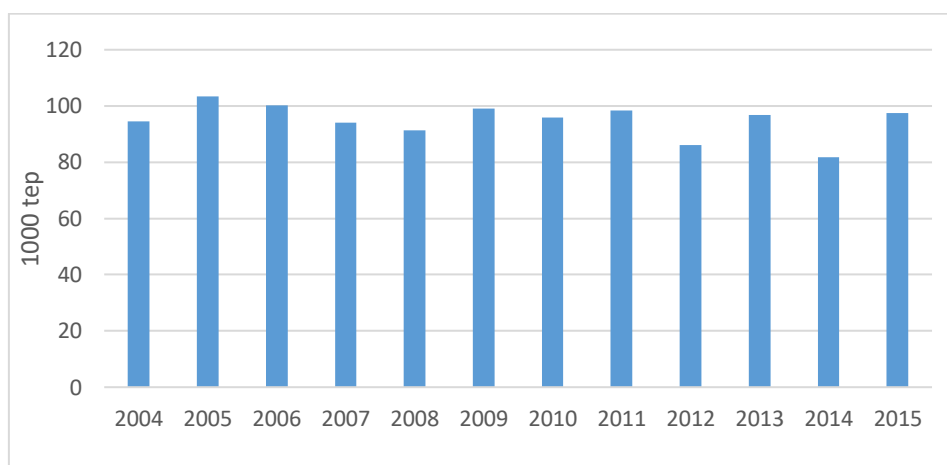


Figura 2.3: Variação ao longo do tempo da utilização do RSU como energia primária.

Através da Figura 2.4, podemos observar o consumo de RSU com fonte de energia primária com outros países da Europa no ano de 2015. Este gráfico foi obtido através dos dados de [5].

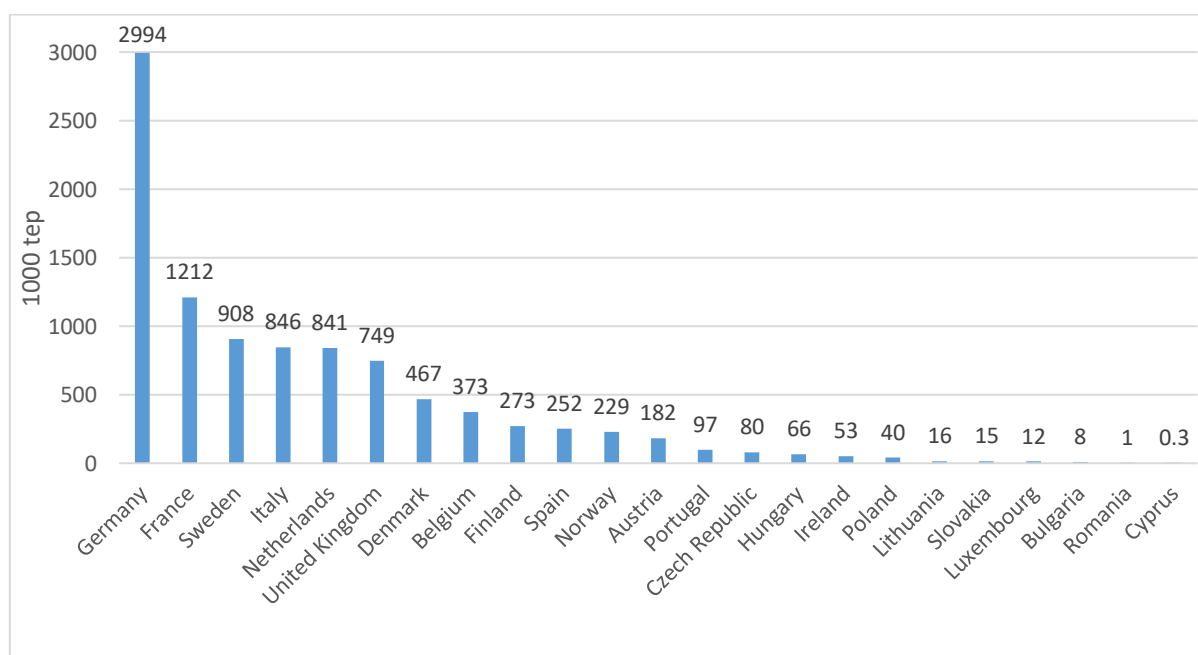


Figura 2.4: Utilização de RSU como fonte de energia primária em 2015 para diferentes países da Europa.

Sistema de gestão de resíduos em Portugal

Através da Tabela 2.3 observa-se que a quantidade de resíduos urbanos produzidos tem diminuído. Embora os objetivos sejam reduzir a produção de resíduos, este decréscimo pode estar associado à situação económica que Portugal atravessou nos últimos anos. Em 2014 já houve um aumento de

produção de resíduos, o que apoia que o decréscimo da produção de resíduos esteve mais relacionado com a crise económica do que com as medidas para reduzir a sua produção.

Tabela 2.3: Produção de resíduos urbanos (10^3 toneladas). [15]

Região	2011	2012	2013	2014
Portugal continental	4 888	4 525	4 363	4 474
R.A. Madeira	124	114	106	110
R.A. Açores	147	143	139	136
Total	5 159	4 782	4 602	4 719
Variação face ao ano anterior	↓6%	↓7%	↓4%	↑2%

Destinos do CDR

Embora a valorização do CDR seja apenas energética, estes podem ter diferentes destinos. Os CDR podem ser valorizados no próprio sector de resíduos com a implementação de cogeneradores, para produção de calor e eletricidade, aumentando assim a sua autossuficiência, ou em unidades dedicadas ao CDR, para redução do volume de resíduos e produção de energia. Pode também ser usado na co-incineração, como combustível de substituição, para fornos de cimenteira ou cerâmica, para centrais de carvão ou de biomassa. [16]

Relativamente a processos, estes podem ser integrados não só em processos de incineração e co-incineração, mas também em processos de pirólise e gaseificação. [2][13][17]

Através da Tabela 2.4, é possível observar para onde foi encaminhado o CDR produzido. Verifica-se uma diminuição em operações de gestão de resíduos com o CDR, que está relacionado com a indisponibilidade do recetor final, em receber o CDR com elevados teores de humidade. [11]

Tabela 2.4: Destinos do CDR produzido (toneladas). [11]

Destino do CDR	2015	2016
Armazenamento	580	440
Operação de gestão de resíduo	28 896	309
Total	29 476	749

2.2. Coletores solares

A energia solar, pode ser captada com diferentes tecnologias e pode ser utilizada para várias aplicações. Os coletores solares podem ser divididos em fotovoltaicos que usam a energia solar para produzir diretamente eletricidade, ou em térmicos que usam a energia solar para produzir energia térmica destinada a calor de processo ou produção de eletricidade através de processo termoelétrico.

Os coletores solares térmicos podem ser classificados de acordo com o nível de temperatura a que funcionam (baixa, média e alta temperatura), o tipo de tecnologia (por exemplo: planos, parabólicos), o nível de concentração, o fluido de transporte primário (ar ou líquido) e quanto ao tipo de seguimento [18]. Os coletores térmicos com fator de concentração inferior a 2 ($C < 2$), não precisam de seguimento solar. Caso o $C > 10$, requer um sistema de seguimento, para garantir a incidência no coletor. [19]

Com o aumento da temperatura, diversifica as aplicações dos coletores. Os coletores podem ser utilizados para sistemas de ar condicionado, produzir vapor e aquecer fluxos de água ou ar com diferentes finalidades, como por exemplo águas quentes sanitárias, climatização ambiente e aquecimento de piscinas. Também podem ser usados na indústria, que embora requeira mais energia e

a temperaturas superiores, podem ser integrados em processos de lixiviação (indústria de mineração), cozinhar, secagem, pré-aquecimento de água da caldeira e do espaço em edifícios industriais, dessalinização de água e produção de vapor e energia elétrica [20][21][22]. Através da Figura 2.5, é possível observar a temperatura de funcionamento dos coletores, bem como a sua aplicação.

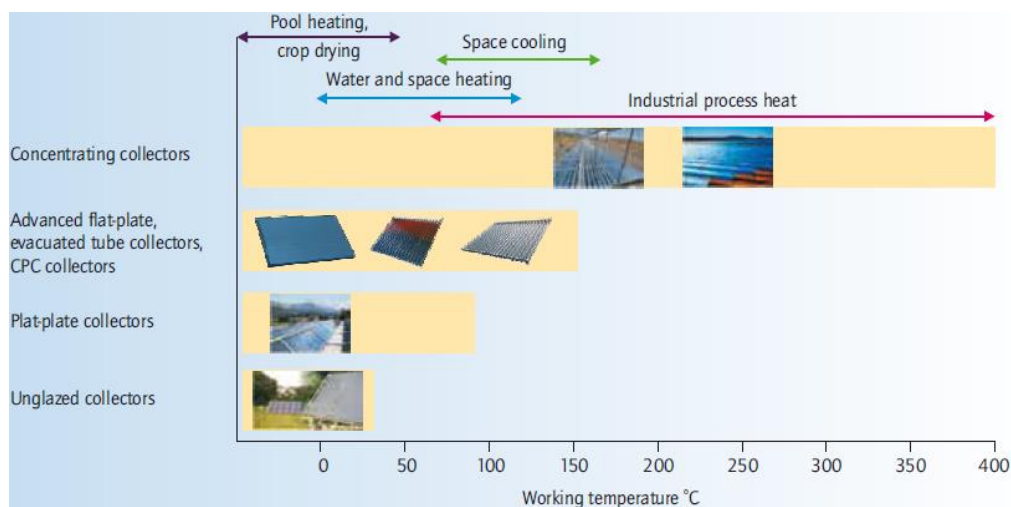


Figura 2.5: Temperatura e aplicação dos coletores solares. [23]

Outra classificação importante nesta tecnologia, é se concentram a energia solar ou não. Nos coletores que não concentram energia solar, podemos encontrar tecnologias como os coletores de placa plana, que podem ser envidraçados ou não e os tubos de vácuo [18]. Através da Tabela 2.5 é possível observar algumas das características destes coletores, e na Figura 2.5, é possível observar as suas representações esquemáticas.

Tabela 2.5: Resumo das características dos coletores planos. [24]

Tipo de coletor	Movimentação	Tipo de absorvedor	Concentração	Temperatura (°C)
Placa plana	Estacionário	Plano	Não	30-80
Tubo de vácuo		Tubular	Sim	50-130
CPC				80-200

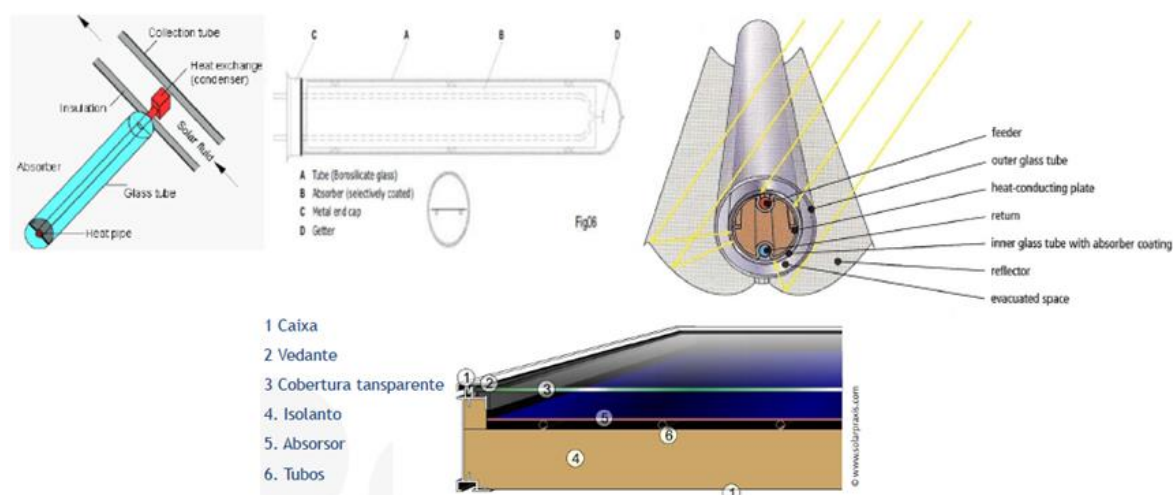


Figura 2.6: Ilustração dos coletores de tubo de vácuo de fluxo indireto e direto, concentrador parabólico composto, e de placa plana.

Na energia solar de concentração (CSP), com níveis de temperatura mais elevados, são usadas tecnologias de concentração linear, como a cilindro-parabólica e lineares de Fresnel, ou tecnologias de concentração pontual, como as torres solares e os discos parabólicos. Em geral, nestas tecnologias a energia é concentrada através de refletores produzindo elevadas temperaturas, tendo menores perdas térmicas em comparação com os coletores não concentradores.

A nível tecnológico, a desvantagem é que apenas a radiação direta (DNI) é considerada, para atingir elevados níveis de eficiência, o que implica a necessidade de condições atmosféricas próprias como o céu limpo. Outras condições meteorológicas, afetam a eficiência da tecnologia CSP, como a temperatura ambiente, que aumenta as perdas por convecção. Quanto mais baixa a temperatura, maiores as perdas e vice-versa. O aumento da humidade relativa do ar, diminui a eficiência de sistema de arrefecimento húmido. Com altas velocidades do vento, aumenta as perdas óticas, devido à distorção da geometria. A velocidade do vento, também aumenta as perdas convectivas, e pode mesmo impedir o funcionamento de forma a proteger os refletores do vento [25]. Através da Tabela 2.6, é possível observar algumas das características dos coletores de concentração solar.

Tabela 2.6: Resumo das características dos coletores concentradores. [26][27]

Tecnologia	Cilindro-Parabólico	Linear de Fresnel	Disco Parabólico	Torre
Seguimento		Um eixo		Dois eixos
Absorvedor		Tubular		Focal
Temperatura (°C)	100-450	60-400	100-500	150-2000
Foco		Linear		Pontual
Recetor	Móvel	Fixo	Móvel	Fixo
Coletores (nº sóis)	70-80	>50	>1300	>1000
Maturidade	Comercialmente provado	Projetos piloto	Projetos de demonstração	Instalações piloto e projetos comerciais em construção

Ao absorver radiação, a temperatura do coletor aumenta. Esse aumento de temperatura vai até onde as condições meteorológicas o permitirem, o que pode criar problemas no sistema de captação de energia, pois pode criar sobreaquecimento, estagnação do fluido, e a temperatura de estagnação.

A estagnação pode ocorrer, caso o coletor não consiga rejeitar a energia absorvida para o fluido primário e é o estado do coletor solar onde a circulação do fluido de transferência é interrompida, embora exista irradiação suficiente para o funcionamento do circuito do coletor. Com a estagnação e com energia solar a ser absorvida, a temperatura e a pressão vão aumentar, até atingir os valores máximos, o que pode danificar o coletor. [28]

A temperatura de estagnação, é a temperatura máxima que o coletor pode atingir, devido à persistência da estagnação. Onde as perdas do coletor solar são iguais à energia absorvida e depende da irradiação e da temperatura ambiente. Nalguns coletores esta temperatura é teórica, porque o coletor danifica-se antes de a atingir. [28]

Diferentes medidas podem ser tomadas para prevenir a estagnação, como por exemplo, utilização de um vaso de expansão; equipamentos resistentes ao calor no circuito primário; conceito drain-back (purgar o sistema até a atingir a temperatura pretendida); e dissipadores de calor. [28]

O sobreaquecimento, é quando é ultrapassada a temperatura de operação. Caso isso aconteça, diferentes partes do sistema solar térmico danificam-se, dependendo da temperatura de operação de cada uma. Por exemplo a degradação das borrachas isoladoras nas bombas e tubagens, e do revestimento do tubo de absorção. [28]

Para evitar o sobreaquecimento pode-se utilizar o arrefecimento automático do tubo de absorção; mudança de temperatura dependente das propriedades óticas do revestimento ou vidro do tubo de absorção; tubagens para limitar a temperatura de operação; arrefecimento do circuito primário; e desfocar os concentradores [28]. A Figura 2.7, ilustra a variação da temperatura ao longo do tempo.

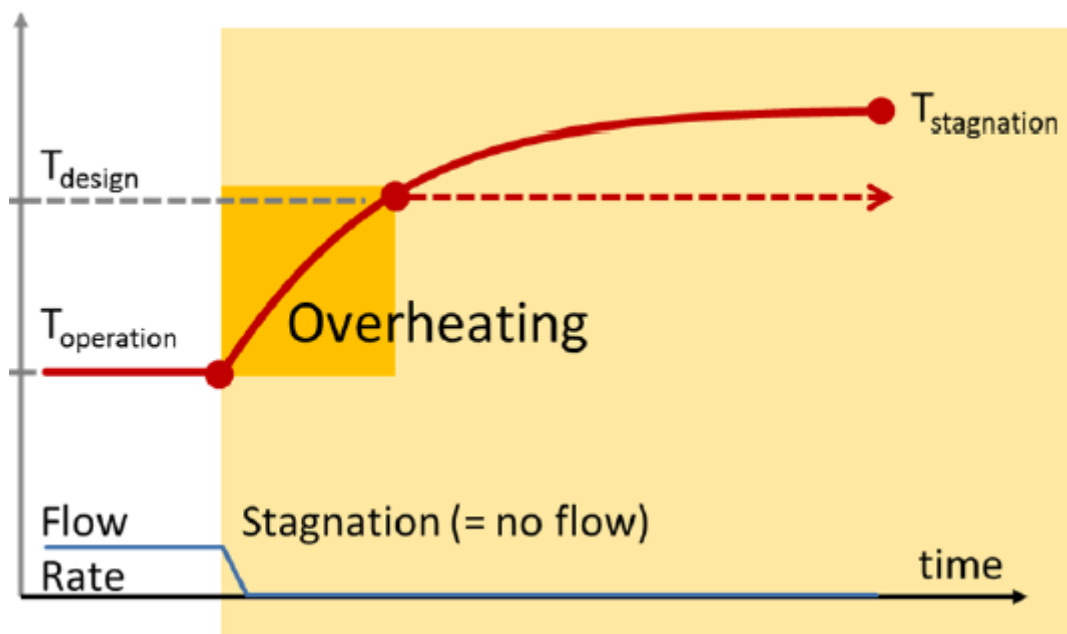


Figura 2.7: Representação da variação da temperatura ao longo do tempo. [28]

Em Portugal existem 3 instalações solar térmicas integradas em processos industriais [29]. Dessas 3 apenas uma (Silampos S.A.) usa tecnologia de CSP. A localização das instalações pode ser observada na Figura 2.8. No mundo, existem cerca de 4815 MW de potência instalada em CSP, e mais a ser

desenvolvido ou em construção. Através da Figura 2.9, é possível observar que a Europa e a América do Norte, são as regiões com mais potência instalada de CSP, mas se compararmos com projetos de desenvolvimento futuro, África e América do Sul, são as regiões com perspectiva futura.



Figura 2.8: Localização das SHIP em Portugal. [29]

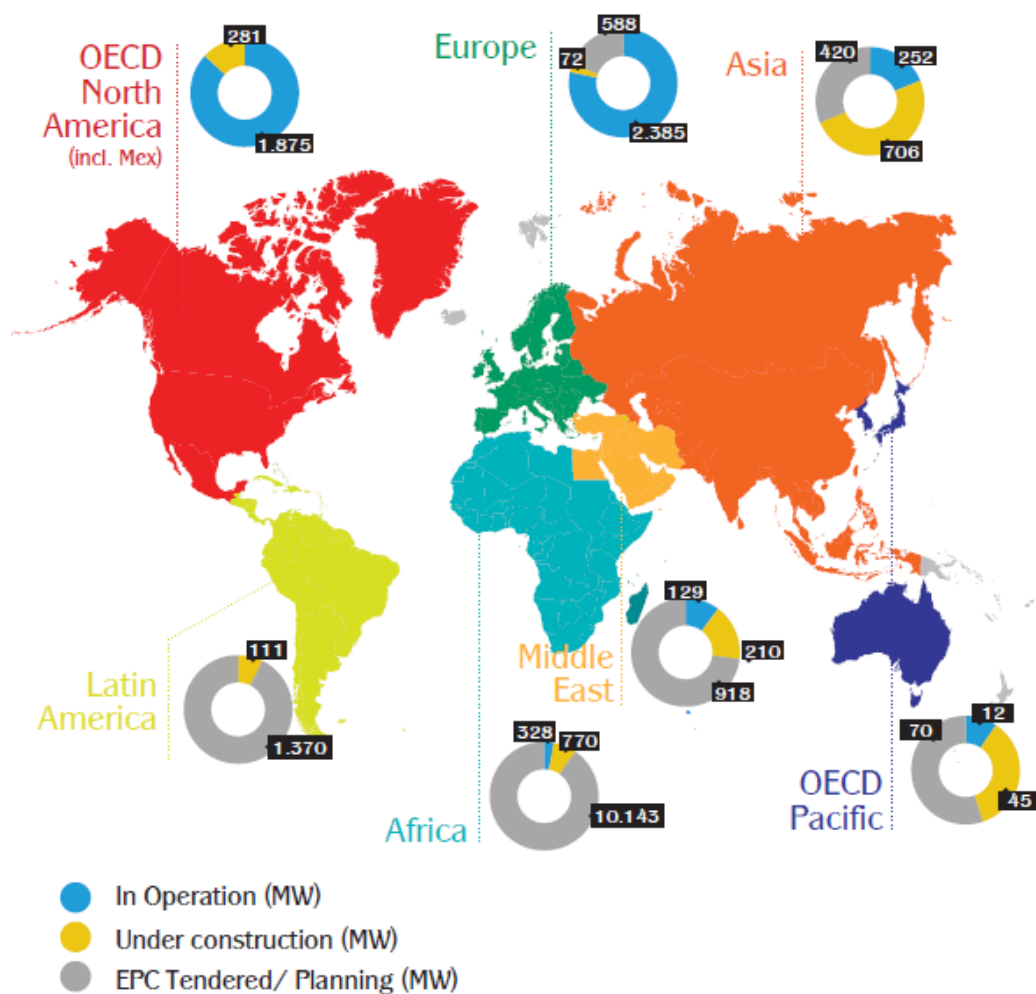


Figura 2.9: Potência instalada, em construção e em desenvolvimento de CSP. [20]

2.2.1. Coletores cilindro-parabólicos

Das tecnologias de elevada concentração solar, esta é a mais utilizada e mais madura. Consiste em fileiras paralelas de espelhos curvados em parábola para refletir e concentrar os raios solares num tubo de absorção colocado no foco da parábola, com revestimento seletivo para absorver elevados níveis de radiação e emitindo pouca radiação infravermelha. Estes tubos estão envolvidos num vidro em vácuo para reduzir as perdas por condução e convecção. O cilindro-parabólico pode ser dividido em coletor (onde se situa o refletor) e recetor.

O refletor, move-se conforme a posição do sol para obter melhor desempenho e frequentemente utiliza óleos sintéticos (podem chegar aos 400 °C) como fluido primário. A sua capacidade de concentração chega às 70-100 vezes nos tubos de absorção atingindo temperaturas entre 350 °C a 550 °C [20]. Através da Figura 2.10, é possível observar o modo de funcionamento do cilindro-parabólico.

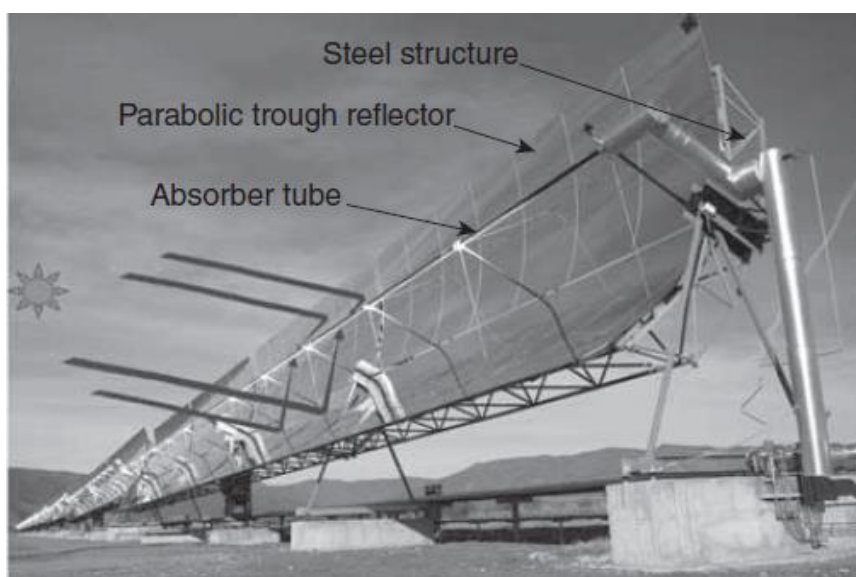


Figura 2.10: Modo de operação do cilindro-parabólico. [25]

Esta tecnologia também pode ser usada para processos de aquecimento industrial, grandes consumidores de água quente doméstica, aquecimento de espaços e piscinas, produção direta de vapor e também existem projetos que usam esta tecnologia para bombear água para irrigação, dessalinização e destoxificação [21]. As vantagens desta tecnologia em comparação com os coletores lineares de Fresnel, é que é mais eficiente, não tem perdas de cosseno transversal, não tem risco de sombreamento entre os refletores e não tem problemas para alcançar a concavidade ideal para os refletores. [30]

Existem diversos parâmetros que descrevem estes coletores como, por exemplo, a distância focal, que é a distância percorrida pela radiação refletida dos refletores até ao ponto focal, e as imperfeições com o aumento da distância focal, provocam maiores desvios da radiação; a área de abertura, que quanto maior for, maior é a quantidade de radiação refletida para o recetor; e o ângulo de bordo, que se for muito pequeno, os refletores têm de ser estreitos, o que reduz a quantidade de radiação refletida, e se for muito grande, a radiação refletida a partir das zonas mais exteriores terão de percorrer distâncias maiores reduzindo o fator de concentração; e o fator de concentração que é decisivo na temperatura a que se quer o fluido de transferência [31]. A Figura 2.11 ilustra o que estes parâmetros descritos.

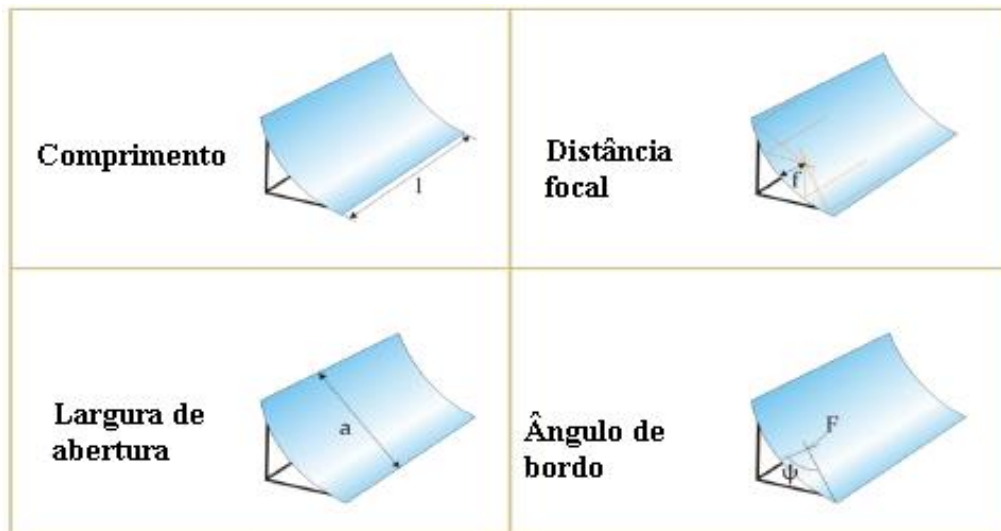


Figura 2.11: Parâmetros dos coletores cilindro-parabólico. [31]

Como já foi referido, a qualidade dos espelhos influencia a concentração da radiação solar, por isso são escolhidos materiais com as melhores propriedades refletivas, e sem defeitos. A refletividade pode ser descrita como a fração de radiação incidente que é refletida, e esta varia conforme o comprimento de onda. Para diferentes aplicações pode ser pretendido uma determinada gama de comprimento de onda, e no caso da energia solar térmica, situa-se na gama do visível. Espelhos revestidos com prata são o material mais utilizado nos refletores. [31]

No recetor, tem de se ter em conta os materiais utilizar, para otimizar a eficiência. A função do recetor é converter a radiação recebida em calor e transferi-la para os tubos de calor, e para tal têm de ter elevados valores de absorção de radiação, bem como reduzidas perdas óticas e térmicas na superfície do recetor. Para o recetor converter o máximo de energia recebida, têm de ser adicionadas camadas isoladoras/ seletivas, e tem de ter a capacidade de estar sujeito a elevadas temperaturas. [31]

O recetor pode ser dividido em dois componentes, nomeadamente, o tubo de absorção, e o tubo de vidro em vácuo. O tubo de absorção tem de ser dimensionado de forma a permitir que toda a radiação refletida pelos espelhos parabólicos perfeitos seja absorvida, ou seja elevado fator de intercepção. Caso o diâmetro seja demasiado grande, implica mais perdas térmicas. No caso do tubo de vidro em vácuo, este vai reduzir as perdas de calor por convecção e condução do tubo de absorção. O material do tubo de vidro tem baixa transmitância no espetro do infravermelho, o que reduz as perdas de radiação térmica. Este tubo de vidro ainda pode ser revestido por uma camada anti refletiva, para baixar a refletividade. [31][32]

2.2.2. Refletor linear de Fresnel

Estes coletores usam longas linhas de refletores planos ou ligeiramente curvados, virados para um recetor fixo. Este sistema é quase semelhante ao cilíndrico parabólico, sendo que nesta tecnologia o tubo de absorção, encontra-se uns metros acima das tiras refletoras, onde recebe a radiação dos refletores secundário. Nesta tecnologia a radiação é refletida das tiras refletoras (refletor primário), para o recetor e refletor secundário. Isto porque, o refletor primário cria ângulos de incidência distintos, e por isso, não é suficiente para alcançar continuamente, a mesma concentração de radiação no recetor, como o cilindro-parabólico [30][25]. A Figura 2.12 e Figura 2.13, ilustram o modo de funcionamento desta tecnologia.

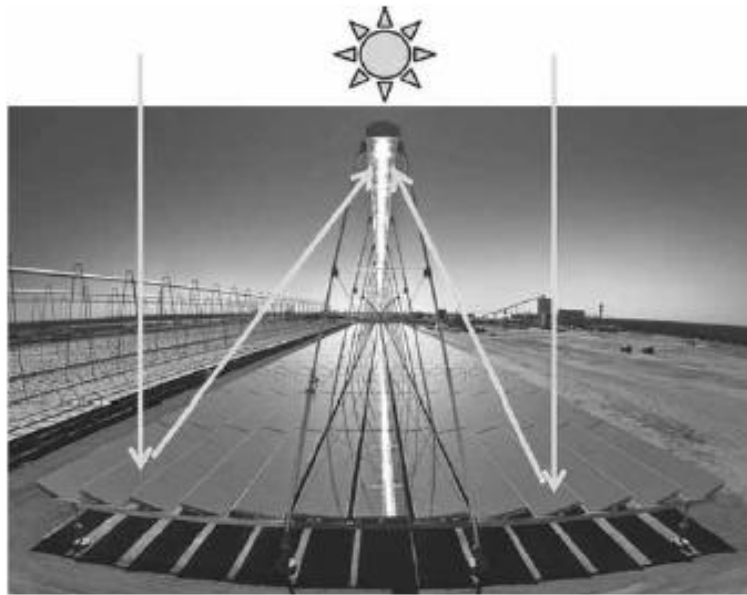


Figura 2.12: Modo de operação dos refletores lineares de Fresnel. [25]

As vantagens desta tecnologia, em relação ao coletor cilindro-parabólico, é que o recetor é fixo e não está ligado às partes móveis que seguem o sol. Isso permite que não sejam necessárias juntas de alta pressão entre os tubos de absorção; o tubo de absorção, que pode ser longo e mais simples; permite uma produção mais fácil de vapor e permite uma distribuição mais constante da radiação no tubo de absorção. [30]

Estes refletores também têm menos manutenção; o alinhamento das tiras de refletores reduz a sobrecarga criada pelo vento; as tiras não precisam de muito espaço entre elas; os mecanismos de movimentação das tiras não precisam de ser tão robustos porque movem cargas menores e requerem menos custos; tem um design mais simples e de construção fácil, com espelhos flexíveis; mas, por outro lado, estes refletores são menos eficientes em comparação com os refletores cilindro-parabólicos. [30]

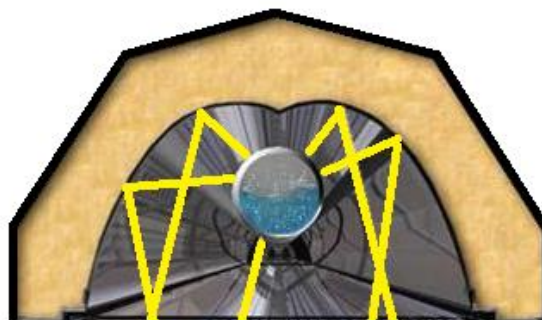


Figura 2.13: Concentrador secundário com tubo de absorção. [30]

2.2.3. Disco parabólico

Esta tecnologia, usa refletores parabólicos para concentrar a radiação direta no recetor, através de um seguimento de dois eixos, pelo que o eixo ótico do concentrador está sempre virado para o Sol. O recetor está ligado a um motor Stirling ou a uma microturbina a gás e está perto, ou no ponto focal do disco parabólico, onde recebe a radiação e a converte para energia térmica. A energia é depois transferida para o motor de calor, onde é convertido em energia mecânica. Depois essa energia mecânica, faz com que um gerador produza eletricidade. A unidade de conversão de energia térmica em elétrica, está toda no ponto focal. De todas as tecnologias de CSP, os discos parabólicos são os que têm maior eficiência ótica,

o mais alto fator de concentração e a maior eficiência de conversão global [33][25]. Através da Figura 2.14, é possível observar o modo de operação do refletor de disco parabólico.



Figura 2.14: Modo de operação do refletor de disco parabólico. [25]

2.2.4. Torre

Esta tecnologia, consiste numa matriz de refletores ou helióstatos, com seguimento a dois eixos, que refletem a radiação direta para um recetor fixo ou um refletor secundário, que estão no topo de uma torre. O recetor interceta a radiação e absorve-a como calor a uma elevada temperatura. Essa energia é depois retirada pelo fluido de trabalho, e pode ser armazenada como energia térmica, produzir eletricidade num gerador, ou como calor num processo. A otimização do recetor é complicada, devido ao número de variáveis a serem consideradas e devido à variação contínua na configuração e desempenho de cada helióstato, à medida que acompanham o Sol. A disposição dos helióstatos, vai depender da configuração do recetor. Por exemplo, o recetor pode ser visto pelos helióstatos em todo o seu redor, ou pode ser apenas absorver radiação de uma direção. [25]

A vantagem desta tecnologia é que a conversão de toda a energia ocorre num único local, o recetor, e permite evitar a necessidade de uma rede de transporte de energia. Mas também a posição fixa do recetor, implica que os helióstatos nem sempre estão virados para o Sol, reduzindo a energia refletida por área de refletor, em comparação com o disco parabólico [25]. Através da Figura 2.15, é possível observar o modo de operação da torre.

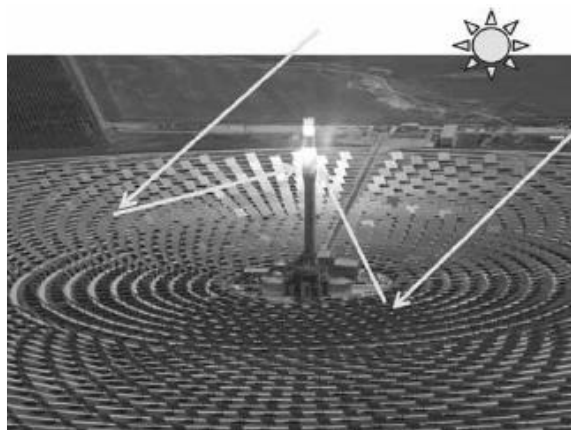


Figura 2.15: modo de operação da torre. [25]

2.2.5. Alinhamento do campo solar

Em todas as tecnologias de concentração solar, é necessário um sistema para seguir o Sol, para garantir a concentração da radiação no recetor. Nos coletores cilindro-parabólicos e nos refletores lineares de Fresnel, são usados sistemas seguidores solares de um eixo. Uma vez que ambos estão na horizontal, estes podem ter qualquer orientação, porque é sempre possível seguir o Sol. Mas se forem alinhados com o eixo Norte-Sul ou Este-Oeste, obtém-se diferentes valores de energia, e isso deve-se a diferentes ângulos de incidência. Através da Figura 2.16 é possível observar uma representação do alinhamento do campo solar.

No caso do alinhamento com Norte-Sul o desempenho do coletor ao longo do dia varia pouco, por norma as perdas do cosseno são maiores ao meio-dia do que de manhã e à tarde, e tendem a compensar; devido aos diferentes ângulos de incidência entre o Verão e o Inverno, as diferenças de produção de energia sazonal são maiores; e produz mais energia durante um ano. [31][32]

No caso do alinhamento Este-Oeste o desempenho do coletor ao longo do dia tem uma maior variação, devido aos grandes ângulos de incidência, em que o desempenho do coletor baixa consideravelmente horas antes do pôr-do-Sol, e horas depois do nascer-do-Sol; a diferença de produção de energia sazonal são menores, porque o ângulo de incidência não é maior no Inverno do que no Verão; é necessário fazer ajustes da orientação dos coletores ao longo do dia; e produz menos energia ao longo do ano. [31][32]

Resumindo ao longo de um ano, a orientação Norte-Sul recolhe um pouco mais de energia do que a orientação Este-Oeste, mas recolhe menos no Inverno. Ao contrário da orientação Este-Oeste que recolhe mais energia no Inverno e menos no Verão. Assim a escolha da orientação depende de quando é preciso mais energia, durante o Verão ou durante o Inverno.

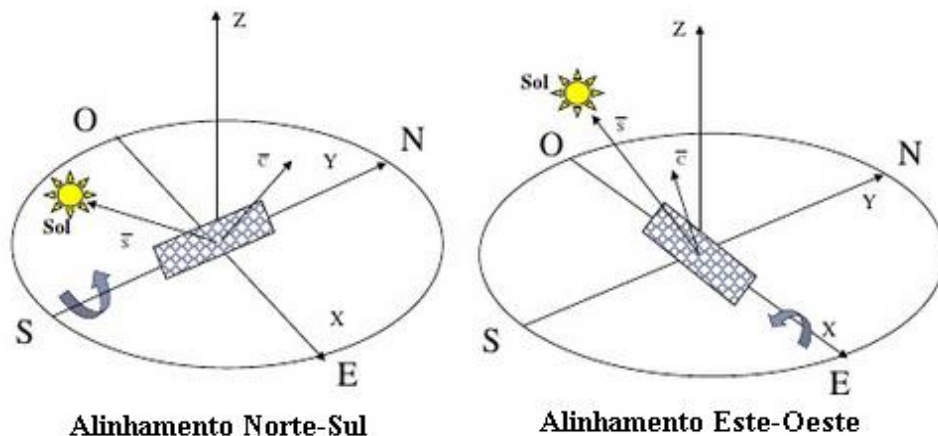


Figura 2.16: Representação da orientação do campo de coletores. [34]

2.3. Processo de secagem

A secagem é um processo térmico, no qual se fornece calor para remover água a um produto, obtendo-se assim um produto final (mais) seco. Quando o produto húmido é submetido ao calor existe uma transferência de energia para o produto, e uma transferência de massa de água para o ar sob a forma de vapor. Este processo também pode criar transformações físicas ou químicas indesejadas, tais como redução de volume, incorporação de ar, cristalização, alteração de cor, de textura, de odor, entre outros.

A secagem é um processo antigo e comum, estando presente em diferentes indústrias como a farmacêutica, química, alimentar, de resíduos, entre outras. A secagem é um meio para chegar a um

objetivo, que pode ser conservar alimentos, facilitar transporte e armazenamento, ou chegar a uma determinada qualidade do produto, que é o caso do CDR.

Existem diversos fatores que condicionam a secagem, tais como a humidade e temperatura iniciais do produto ou do gás de secagem, direção e caudal do fluido, forma física do produto a secar, a sua agitação, as dimensões do material a secar, e a área de contato do produto que se pretende evaporar. O ideal, relativamente ao consumo energético da secagem, é um nível de humidade baixo com temperatura alta, e uma elevada área de contacto do material a secar.

Através do controlo simples de certas variáveis é possível otimizar a secagem. Fatores como o tempo de contato do material a secar com o gás de secagem, em que quanto maior for o tempo mais água se consegue retirar do material, o caudal de gás de secagem, que com o seu aumento permite uma maior remoção da água, e a temperatura que quanto maior for, maior é a transferência de calor e maior é a evaporação. Mas para secar não se deve deixar o CDR atingir uma temperatura superior a 80 °C, pois existem materiais plásticos que iniciam mudança de fase aos 90 °C [35], o que dá a capacidade ao material de colar criando aglomerados, ou aderir aos equipamentos. Como já descrito anteriormente, o CDR é uma mistura heterogénea de diferentes tipos de resíduos, e a sua homogeneização permite uma secagem mais eficaz.

A transferência de calor pode acontecer sob a forma de radiação (luz solar, infravermelhos, micro-ondas), condução (contato com uma superfície quente – secagem indireta), ou convecção (contato com um gás de secagem – secagem direta).

Na convecção, o calor é fornecido por um fluxo de ar, que passa sobre o produto a secar e vai permitir a mudança de fase da água, resultando em humidade evaporada. Podem-se utilizar diferentes fluidos, tais como ar, gás inerte, gases diretos da combustão ou vapor sobreaquecido. Na condução, o calor é fornecido através de superfícies quentes e o evaporado é removido por vácuo ou por um fluido que apenas funciona como transportador.

No uso de radiação eletromagnética, diferentes comprimentos de onda, têm diferentes penetrações no material a secar. A radiação no espectro solar apenas penetra na superfície do material, mas já a radiação no espectro infravermelho, tem mais capacidade de penetração, e já pode ser usada para secar massas finas, revestimentos ou películas. Já no caso da radiação no espectro radio, a resistência à penetração da radiação baixa drasticamente, o que permite usar esta radiação para secar sólidos com maiores volumes. [36]

2.3.1. Tipos de secadores

Os secadores podem ser classificados de diretos, indiretos ou especiais. Esta classificação está relacionada com o método de transferência de calor utilizado. Quando um fluxo de gás passa pelo material e realiza uma troca de calor, considera-se método direto. No método indireto, o fluxo é separado do material, sendo a troca de calor efetuada através de uma superfície. No caso dos especiais, e quando se usa o vácuo para produtos que precisam de baixas temperaturas, congelação para secar sem descongelar o produto, ou spray para secar produtos líquidos. [37]

Sendo assim, os sistemas diretos são mais simples e económicos. Estes sistemas são usados quando o contato entre os gases e o material a secar não é considerado prejudicial, e os indiretos são usados quando não se podem usar os métodos diretos, para não danificar o material ou por causa de partículas finas que possam ser arrastadas. Na indústria, a maioria dos secadores são do tipo direto, embora tenham menos eficiência térmica porque é difícil recuperar o calor latente da vaporização na exaustão. [36]

Os secadores também podem ser classificados de acordo com o seu funcionamento, ou seja, contínuos ou descontínuos. Nos secadores contínuos, estes secam o material conforme o recebem, enquanto nos descontínuos, apenas funcionam quando tiverem uma determinada quantidade de material para secar. Alguns secadores são desenvolvidos para superar problemas e desvantagens apresentados pela indústria, como desempenho, custos, qualidade, ou capacidade de secagem.

2.3.1.1. Secador rotativo indireto

O material a secar entra pela parte superior do secador e à medida que desce, é retirada humidade ao material. Por norma, o gás de secagem entra em contracorrente. Este secador é um tubo cilíndrico com uma inclinação entre 1° a 5° em relação à horizontal para facilitar o transporte pelo tubo. Um conjunto de tubos de vapor são colocados simetricamente em volta do cilindro, rodando com ele. O condensado criado pode ser drenado pelos tubos de vapor por gravidade para o coletor de descarga, por tubos simples, ou tubos baioneta.

Este secador tem uma reduzida deterioração do material a secar, em relação ao secador rotativo direto, pois não existe uma exposição excessiva à alta temperatura do meio de secagem, nem a adsorção de substâncias tóxicas [36][38]. A Figura 2.17 ilustra o funcionamento deste secador.

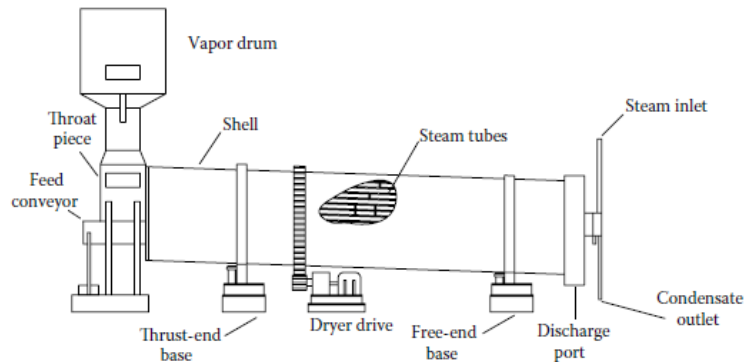


Figura 2.17: Secador rotativo indireto. [36]

2.3.1.2. Secador rotativo direto

Tal como o secador rotativo indireto este secador é constituído por um tubo cilíndrico com uma ligeira inclinação. A principal diferença é que, neste caso, o fluxo de gás passa pelo cilindro juntamente com o material a secar, o que limita a temperatura utilizada para não haver degradação do material a secar. Existe também o forno rotativo direto que é igual ao secador rotativo direto, com a diferença de que no seu interior existe um revestimento de tijolo refratário, para se utilizar temperaturas altas [36][38]. A Figura 2.18 ilustra o funcionamento deste secador.

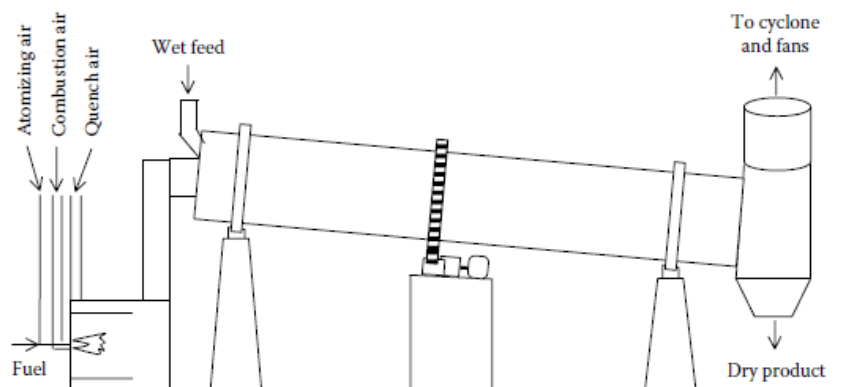


Figura 2.18: Secador rotativo direto. [36]

2.3.1.3. Secador de agitação

Os primeiros secadores de agitação a serem desenvolvidos eram verticais, descontínuos e em forma cônica. São usados por norma para produtos farmacêuticos e químicos, sob vácuo.

A agitação é feita por um parafuso que pode ser aquecido para fornecer aquecimento adicional, para além daquele que é fornecido através das paredes. O parafuso, para além de rodar sobre o próprio eixo, também circula pelo perímetro da câmara, o que ajuda na limpeza das paredes. Este secador fornece o calor indiretamente por água quente, vapor ou óleo quente. O vapor gerado pode depois ser retirado por bombas de vácuo e caso necessário pode passar por um condensador para recuperar o solvente.

Os *designs* horizontais consistem numa câmara estacionária horizontal cilíndrica, com um conjunto de pás agitadoras no centro que misturam e transportam o material. Nestes *designs* podem ser instalados equipamentos para remover materiais aderentes, mas para reduzir este problema minimiza-se a distância entre as paredes e as pás. O material é admitido através de uma bomba, parafuso ou válvula rotativa. Do outro lado do secador, o material pode ser retirado por um parafuso, válvula rotativa, ou uma válvula de borboleta dupla. Já o vapor pode ser retirado pelo exaustor, limpador de gases, condensador, ou bomba de vácuo pelo topo da câmara [36]. A Figura 2.19 ilustra o funcionamento deste secador.

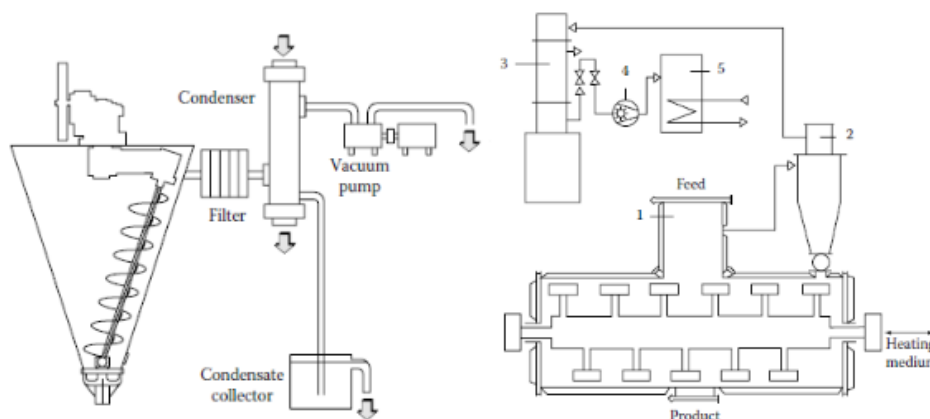


Figura 2.19: Secador vertical e horizontal de agitação. [36]

2.3.1.4. Secador de leito fluidizado com vibração

Existem diferentes tipos de secadores de leito fluidizado, sendo que a sua designação varia de acordo com modo de funcionamento. O funcionamento dum secador de leito fluidizado, passa pela passagem de um fluxo de ar ascendente, pelo produto a secar num leito, com velocidade suficiente para suportar

o peso das partículas. Isso permite a fluidização do produto, permitindo uma maior evaporação, maior eficiência térmica, mais facilidade de transporte do produto no secador, e baixos custos de manutenção. A Figura 2.20, ilustra um secador de leito fluidizado.

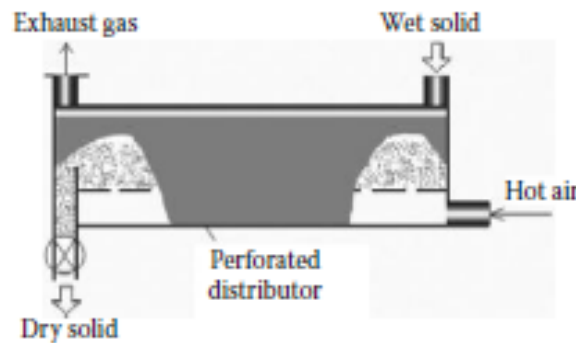


Figura 2.20: Secador de leito fluidizado. [36]

Ao combinar a vibração do leito com um fluxo de ar ascendente permite que a velocidade de fluidização do produto seja menor em comparação de um leito fluidizado sem vibração. Adicionalmente a vibração permite a redução do atrito entre partículas, e das partículas com os equipamentos. Esta vibração também pode permitir a melhor circulação de sólidos e reduzir a aglomeração de partículas, assim como a sua condução pelo leito. Um problema associado ao secador de leito fluidizado com vibração, em comparação com os sem vibração, é o ruído acústico. [36]

Um secador bastante semelhante ao de leito fluidizado, é o secador de correia. A diferença é que o fluxo de ar não tem velocidade suficiente para suportar o peso das partículas, e pode ser descendente. [36][39]

Capítulo 3 - Metodologia

A possível implementação do sistema de secagem que se aborda neste trabalho, deverá ocorrer no aterro sanitário da GESAMB, perto de Évora. A GESAMB – Gestão Ambiental e de Resíduos, EIM, é uma empresa intermunicipal do distrito e é responsável pela gestão e exploração do Sistema Intermunicipal de Valorização e Tratamento de Resíduos Urbanos do Distrito de Évora (SIRU).

Para se proceder à análise de um sistema de secagem, tem de se determinar as necessidades, neste caso quantidade de CDR a secar, considerando para o efeito a capacidade e eficiência dos equipamentos selecionados. A área do campo solar, onde se incluem os concentradores solares, deverá ter em consideração que parte das necessidades se pretendem satisfazer, visto que em condições normais existe maior disponibilidade de recurso solar no Verão, em oposição ao Inverno. Desta forma, se o campo solar for dimensionado para satisfazer as necessidades de secagem que se verificam por altura dos equinócios, conclui-se que, eventualmente, será excedentário no Verão e insuficiente no Inverno.

Uma das soluções será considerar a possibilidade de efetuar armazenamento sazonal, ou seja, sendo o campo insuficiente no Inverno, o CDR em excesso seria armazenado para poder ser seco no Verão quando existe maior disponibilidade do recurso. De outra forma, seria necessário recorrer a fontes de energia convencionais para proceder à secagem na presença de recurso insuficiente.

Neste caso particular, a área disponível para a implantação do campo solar é limitada, e como tal, o campo solar vai ter em conta a área disponível e não as necessidades de secagem.

De uma forma geral, os coletores solares irão converter a radiação solar em energia térmica destinada a aquecer o fluido de transporte, neste caso um caudal de água, que vai transferir energia para um caudal de ar de secagem num permutador de calor. Considerando que, com o aumento da temperatura, o ar tem maior capacidade de absorver água. A humidade relativa é a relação entre a quantidade de humidade que se encontra no ar e a quantidade de humidade máxima (saturação) que o ar pode conter à temperatura considerada em causa e que no processo de aquecimento do ar de secagem se verifica conversão de massa, verifica-se, por um lado, que o ar de secagem mantém a sua humidade absoluta e, por outro lado, que essa quantidade de humidade em relação ao valor de saturação diminui; de onde se conclui que ao aumento da temperatura do ar corresponde uma redução da humidade relativa. O ar, agora com mais calor sensível, vai passar pelo CDR, onde se realizam trocas de energia e massa. Devido à diferença de temperatura entre o ar de secagem e o CDR, o primeiro transfere calor para o segundo (troca de energia), que é absorvido no CDR húmido, parte dele irá aumentar o calor sensível do CDR e outra parte vai fazer evaporar parte da água contida no CDR, ocorrendo assim uma troca de massa do CDR para o ar de secagem, conforme pretendido. Após passagem do ar de secagem pelo CDR, verifica-se que o ar se encontra mais frio e com maior humidade relativa. A Figura 3.1 e a Figura 3.2, são uma representação esquemática dos sistemas em estudo.

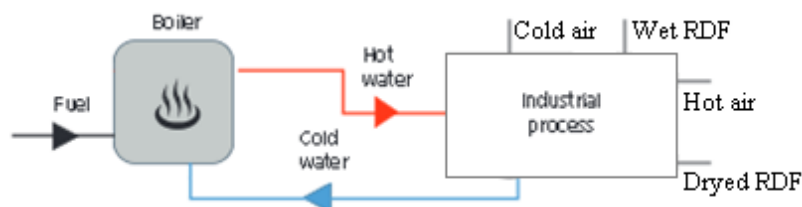


Figura 3.1: Representação esquemática do sistema convencional, sem coletores integrados. [3]

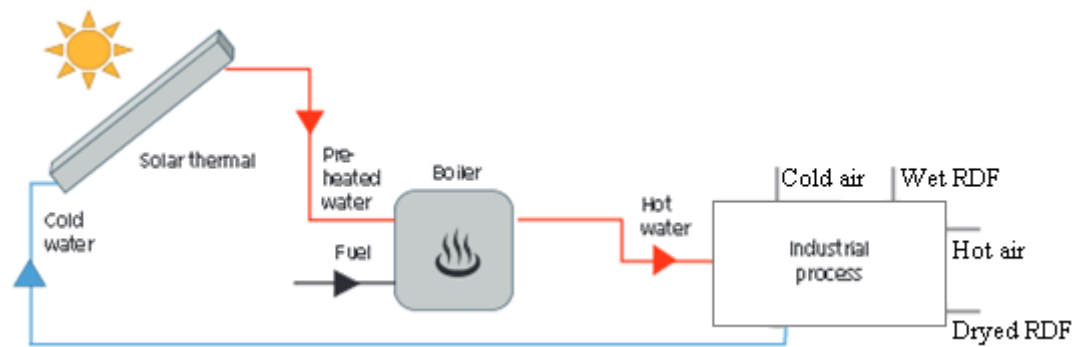


Figura 3.2: Representação esquemática do sistema com coletores integrados. [3]

3.1. Software

Neste trabalho foi utilizado o simulador TRNSYS. O TRNSYS é um programa de simulação de sistemas de energia em regime transiente, ou seja, pretende calcular a transmissão de calor e massa, com variação no tempo. Este é um programa complexo que tem a capacidade de simular desde sistemas solares térmicos, sistemas fotovoltaicos, consumo energético em edifícios, sistemas AVAC, entre outros. Este programa, é um programa modular que permite a adição de modelos matemáticos, seja através de *types* (modelos mais complexos predefinidos que permitem simular um componente no processo), seja através de equações (modelos mais simples que poderão substituir um modelo mais complexo).

O *time-step* considerado neste estudo foi de 30 minutos, o que significa que a discretização mínima das necessidades e o período de integração utilizado foi de 30 minutos. Em condições normais, a informação de disponibilidade de recurso solar é horário, mas quando as variações no processo o exigem, valores mais baixos podem ser utilizados. No cálculo horário verificou-se perda de informação, o que foi resolvido através da redução do intervalo de integração.

Pode-se dizer que esta simulação foi feita num regime transiente. Uma vez que não existe produção de CDR nas instalações em estudo, os dados utilizados são médias mensais e estimativas, o que não justifica uma simulação transiente, de segundo a segundo.

O programa de cálculo *Excel*, foi também utilizado para determinar os vários indicadores das simulações como por exemplo o consumo de combustível e emissões de CO₂ por quantidade de CDR, e para determinar a viabilidade financeira das diferentes simulações.

3.2. Produção de CDR seco

3.2.1. Produção de CDR pré-secagem

Na GESAMB, o CDR é obtido através do refugo das linhas de tratamento mecânico e biológico (TMB). Após o TMB, o resíduo passa por um triturador primário para reduzir o volume, de seguida passa por um separador de pesados e metálico para retirar as frações de maior dimensão e os metais. Por fim passa num triturador secundário, obtendo-se um CDR húmido, antes de ser direcionado para o secador. A quantidade de CDR produzida vai depender da eficiência da linha TMB, ou seja, o resíduo que consegue reaproveitar. A Figura 3.3, foi obtida através dos dados da GESAMB, e mostra as diferentes frações do CDR.

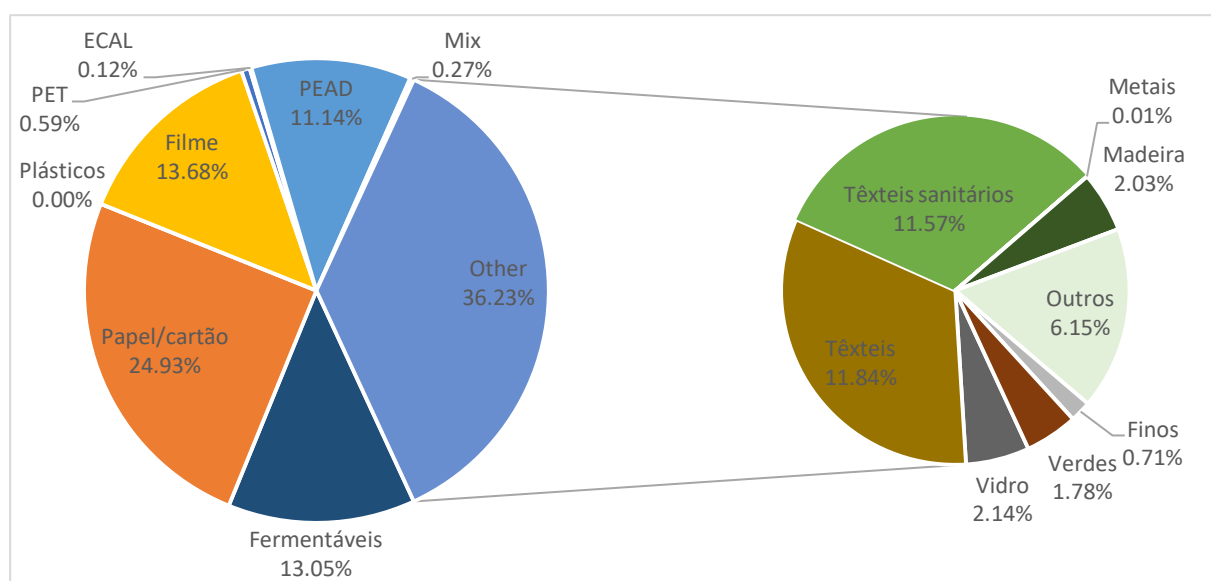


Figura 3.3: Composição do CDR após trituração e separação. (PET- Politereftalato de etileno; ECAL - Embalagens de Cartão para Alimentos Líquidos; PEAD - Polietileno de Alta Densidade)

Na Tabela 3.1 é apresentado o horário de trabalho da empresa. Este corresponde ao horário em que a linha de CDR vai estar em funcionamento, e vai definir o caudal de CDR a secar, isto porque a produção de resíduos para obtenção do CDR, é independente do horário de funcionamento do aterro. Mas nem sempre é possível ter a linha de CDR em operação, isto porque é necessário realizar paragens para manutenção, ou paragens imprevisíveis no caso de avarias.

A GESAMB indica que perto de 20 % das horas de trabalho possíveis, são paragens para manutenção ou reparação. Sendo assim, a linha de CDR está em funcionamento apenas 80 % das horas de trabalho possíveis. Devido à incerteza das paragens para manutenção, distribuiu-se a indisponibilidade de igual modo por cada mês, para que não favorecesse ou prejudicasse as necessidades de secagem, uma vez que estas estão dependentes do número de horas que se trabalha.

Tabela 3.1: Dados relativos ao horário de trabalho.

Horário em dias úteis	15 (6:00-21:00)
Horário ao Sábado	5 (6:00-11:00)
Total por semana	80
Disponibilidade horária	80%

A Tabela 3.2, é relativa à quantidade de CDR que se irá produzir em cada mês, bem como a respetiva percentagem de humidade estimada. Os dados relativos à produção de resíduos e de CDR foram obtidos a partir da Auditoria Energética realizada em 2016 [40]. No entanto, atualmente não se produz CDR e os valores apresentados são uma estimativa. O cálculo desta estimativa tem por base a quantidade de resíduos processados mensalmente, considerando que os CDR deverão ser cerca de 46 % do total dos resíduos.

A humidade existente no CDR varia entre 35 % (mínimo que ocorre nos 3 meses mais quentes) a 50 % (máximo que ocorre em Janeiro) de acordo com a coluna “Base húmida” da Tabela 3.2. Através da Figura 3.4 e da Figura 3.5, é possível ver com mais detalhe a variação da humidade e da quantidade de CDR ao longo do ano.

Tabela 3.2: Dados mensais do CDR.

Mês	Total de resíduos (t)	Total de CDR (t)	Humidade	
			Base húmida (kg H ₂ O/ kg CDR)	Base seca (kg H ₂ O/ kg CDR)
Janeiro	6590,92	3053,67	0,50	1,00
Fevereiro	5923,14	2744,28	0,45	0,82
Março	6884,25	3189,58	0,42	0,72
Abril	6922,53	3207,31	0,39	0,64
Mai	6484,84	3004,52	0,37	0,59
Junho	6769,18	3136,26	0,35	0,54
Julho	7350,41	3405,56	0,35	0,54
Agosto	7232,26	3350,81	0,35	0,54
Setembro	6588,96	3052,77	0,36	0,56
Outubro	6753,38	3128,94	0,38	0,61
Novembro	7136,54	3306,47	0,43	0,75
Dezembro	7370,42	3414,83	0,47	0,89
Total	82006,83	37995,00		

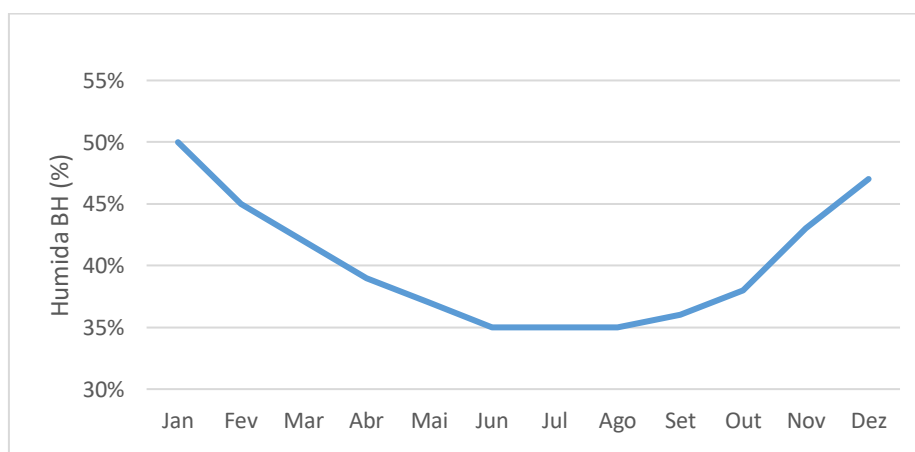


Figura 3.4: Variação da humidade base húmida no CDR ao longo do ano.

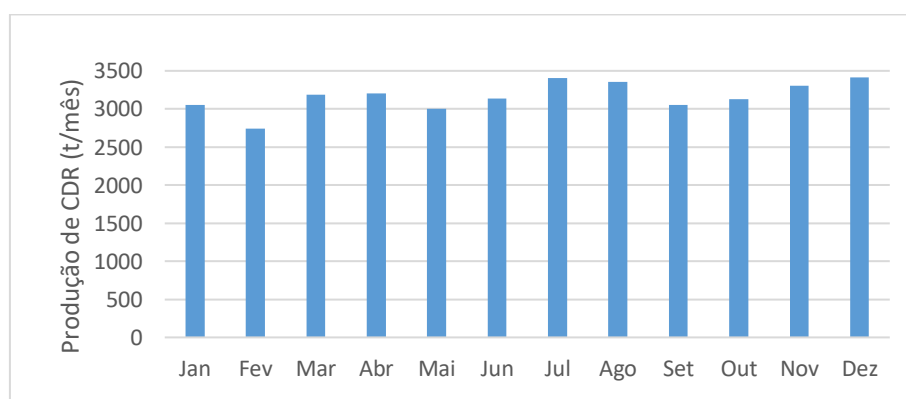


Figura 3.5: Variação da produção de CDR ao longo do ano.

3.2.1. Necessidades de secagem

Neste trabalho, para estudar o sistema de secagem de CDR foram analisados dois secadores, um da empresa TEMA (Holanda) e outro da empresa STELA (Alemanha). A proposta da TEMA, é um secador de leito fluidizado com vibração, e foi realizada antes do início deste trabalho, pelo que as condições de funcionamento foram definidas de acordo com necessidades anteriores da GESAMB. Sendo o secador o elemento central deste processo, torna-se importante permitir o “*best value for money*”. Para tal foi feito o contato com a STELA, e obteve-se uma proposta de um secador de correia. A Figura 3.6 ilustra os secadores em questão.



Figura 3.6: Exemplos de um secador da TEMA, à esquerda, e de um secador da STELA, à direita.

3.2.3. Balanços

Para efetuar os balanços de massa e de energia para a secagem, para ambos os secadores foi necessário compreender o funcionamento do equipamento.

O equipamento e o seu respetivo funcionamento podem ser divididos em duas zonas distintas: uma zona a montante, onde a energia térmica produzida nos coletores é levada ao secador pelo fluido de transporte (neste caso, água) e é parcialmente transferida para o ar de secagem; e uma segunda zona a jusante, onde o ar de secagem permite aumentar o calor sensível do CDR húmido, promovendo, assim, a evaporação de grande parte da água contida no CDR.

A Figura 3.7, mostra a fronteira do sistema, bem como os caudais envolvidos para a determinação dos balanços de massa e energia.

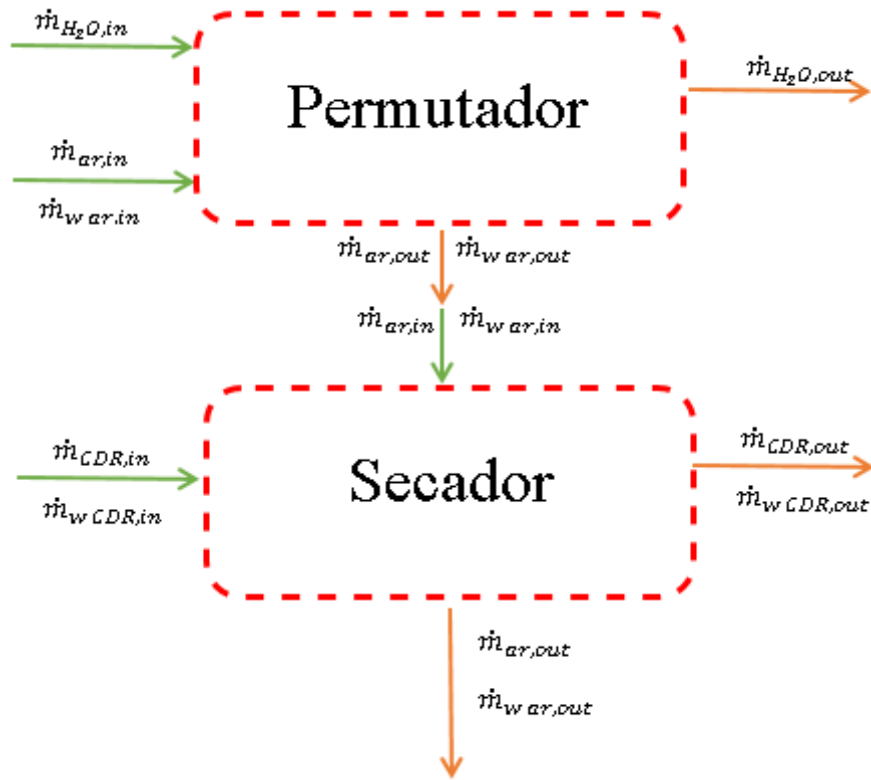


Figura 3.7: Representação esquemática dos fluxos de massa no sistema de secagem.

Para ambos os equipamentos de secagem são aplicadas as mesmas equações.

Balanco de massa ao secador

$$\dot{m}_{CDR,in} * w_{CDR,in} + \dot{m}_{ar,in} * w_{ar,in} = \dot{m}_{CDR,out} * w_{CDR,out} + \dot{m}_{ar,out} * w_{ar,out} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{ar,in} = \dot{m}_{ar,out} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{CDR,in} = \dot{m}_{CDR,out} \quad (3)$$

$$w = \dot{m}_{H_2O} / \dot{m} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{CDR} = \dot{m}_{CDR,bh} * (1 - w_{CDR,bh}) \quad (5)$$

Balanco de energia ao secador

$$Q_{CDR,in} = \dot{m}_{CDR} (C_{p_{CDR}} + w_{CDR,in} * C_{p_{H_2O}}) * \Delta T_{CDR,in} \quad (6)$$

$$Q_{CDR,out} = \dot{m}_{CDR} (C_{p_{CDR}} + w_{CDR,out} * C_{p_{H_2O}}) * \Delta T_{CDR,out} \quad (7)$$

$$Q_{ar,in} = \dot{m}_{ar} (C_{p_{ar}} + w_{ar,in} * C_{p_{vap}}) * \Delta T_{ar,in} \quad (8)$$

$$Q_{ar,out} = \dot{m}_{ar} (C_{p_{ar}} + w_{ar,out} * C_{p_{vap}}) * \Delta T_{ar,out} \quad (9)$$

$$Q_{fg} = (\dot{m}_{H_2O \text{ no CDR in}} - \dot{m}_{H_2O \text{ no CDR out}}) * h_{fg} \quad (10)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (11)$$

Balanco de massa ao permutador

$$\dot{m}_{ar,in} = \dot{m}_{ar,out} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{H_2O,in} = \dot{m}_{H_2O,out} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{war,in} = \dot{m}_{war,out} \quad (14)$$

Balanco de energia ao permutador

$$Q_{H_2O,in} = \dot{m}_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * \Delta T_{H_2O,in} \quad (15)$$

$$Q_{H_2O,out} = \dot{m}_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * \Delta T_{H_2O,out} \quad (16)$$

$$Q_{ar,in} = \dot{m}_{ar}(C_{par} + w_{ar,in} * C_{pvap}) * \Delta T_{ar,in} \quad (17)$$

$$Q_{ar,out} = \dot{m}_{ar}(C_{par} + w_{ar,out} * C_{pvap}) * \Delta T_{ar,out} \quad (18)$$

Onde:

ΔT_{ar}	Diferença entre a temperatura do ar à saída ou entrada e a T_{ref} ;
ΔT_{H_2O}	Diferença entre a temperatura da água à entrada e saída do permutador e a T_{ref} ;
ΔT_{CDR}	Diferença entre a temperatura do CDR à entrada e saída do secador e a T_{ref} ;
T_{ref}	Temperatura de referência ($T_{ref}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$);
Q_{CDR}	Energia associada ao CDR que entra ou sai do secador (kW);
Q_{ar}	Energia associada ao ar aquecido que entra ou sai do permutador ou secador (kW);
Q_{fg}	Calor latente necessário para evaporar a água no CDR para o ar de secagem (kW);
Q_{H_2O}	Energia associada à água que entra ou sai do permutador (kW);
\dot{m}_{H_2O}	Caudal de água no ar ou no CDR na entrada ou saída (kg/s);
\dot{m}_{ar}	Caudal mássico do ar de secagem (kg/s);
\dot{m}_{H_2O}	Caudal de água (kg/s);
\dot{m}_{CDR}	Caudal de CDR em base seca (kg/s);
w_{ar}	Humidade do ar em base seca (kg/ kg ar seco);
w_{CDR}	Humidade em base seca associada ao \dot{m}_{CDR} (kg/ kg CDR seco);
$w_{CDR,bh}$	Humidade em base húmida do CDR (kg/kg CDR);
C_{par}	Calor específico do ar (kJ/ kg.K);
C_{pvap}	Calor específico de vapor (kJ/ kg.K);
C_{pCDR}	Calor específico do CDR (kJ/ kg.K);
C_{pH_2O}	Calor específico da água (kJ/ kg.K);
h_{fg}	Diferença entre a entalpia de vapor saturado, e líquido saturado (kJ/ kg).

Considerando o ponto de funcionamento dos secadores, como o caudal de CDR, a sua humidade de entrada e saída e a temperatura de saída do ar de secagem do secador como um valor próximo da temperatura de saída do CDR, é possível rearranjar as equações (6) a (10) de forma a obter a equação (19). O mesmo pode ser feito para o caudal de água necessário no permutador, com as equações (15) à (18), com as quais é possível determinar a equação (20).

$$T_{ar\ out} = T_{ref} + \frac{Q_{CDR,in} + Q_{ar,in} - Q_{CDR,out} - Q_{fg}}{\dot{m}_{ar}(C_{par} + w_{ar,out} * C_{pvap})} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{ar}(C_{par} + w_{ar,in} * C_{pvap}) * \Delta T_{ar}}{C_{pH_2O} * \Delta T_{H_2O}} \quad (20)$$

As seguintes constantes foram utilizadas para determinar a temperatura do ar à saída. De referir que os C_{pvap} foram determinados através de [41]:

$$\begin{aligned} C_{pCDR} &= 1,3 \text{ kJ/kg.K} & C_{pvap} &= 1,99 \text{ kJ/kg.K} \\ C_{pH_2O} &= 4,1868 \text{ kJ/kg.K} & C_{par} &= 1,005 \text{ kJ/kg.K} \end{aligned}$$

Através da Tabela 3.3 e da Tabela 3.4, é possível observar os principais resultados para as condições nominais.

Tabela 3.3: Resultados obtidos das condições nominais para o secador TEMA.

Secador		Permutador			
CDR	in	out	Ar	in	out
\dot{m}_{CDR} (kg/s)		1,67	\dot{m}_{ar} (kg/s)	22,92	
w_{bh} (kg/kg CDR)	0,4	0,2	T_{ar} (°C)	5	129
T_{CDR} (°C)	20	50	Q_{ar} (kW)	116	2993
Q_{CDR} (kW)	136	196			
Ar		Água			
\dot{m}_{ar} (kg/s)		22,92	\dot{m}_{H_2O} (kg/s)	17,18	
w_{ar} (kg/kg Ar seco)	0,0027	0,0330	T_{H_2O} (°C)	140	100
T_{ar} (°C)	129	52	Q_{H_2O} (kW)	10071	7193
Q_{ar} (kW)	2993	1280			
Q_{fg} (kW)		1654			

Tabela 3.4: Resultados obtidos das condições nominais para o secador STELA.

Secador		Permutador			
CDR	in	out	Ar	In	out
\dot{m}_{CDR} (kg/s)		1,39	\dot{m}_{ar} (kg/s)	50	
w_{bh} (kg/kg CDR)	0,5	0,2	T_{ar} (°C)	16	90
T_{CDR} (°C)	16	37	Q_{ar} (kW)	816	4592
Q_{CDR} (kW)	122	121			
Ar		Água			
\dot{m}_{ar} (kg/s)		50	\dot{m}_{H_2O} (kg/s)	30,06	
w_{ar} (kg/kg Ar seco)	0,0078	0,0286	T_{H_2O} (°C)	100	70
T_{ar} (°C)	90	39	Q_{H_2O} (kW)	12587	8811
Q_{ar} (kW)	4592	2088			
Q_{fg} (kW)		2514			

Através das equações anteriores obtemos todos os dados necessários para o processo de secagem em condições nominais. Como as condições atmosféricas e do CDR variam ao longo do tempo, assim também varia a capacidade do secador de secar CDR.

Rearranja-se novamente as equações de (6) a (10) de forma a obter a equação (21). Através da Figura 3.8, é possível comparar os caudais de CDR.

$$\dot{m}_{CDR} = \frac{\left(Q_{ar\ out} - Q_{ar\ in} + \left(\dot{m}_{ar} * w_{ar\ in} * C_{p\ vap} * T_{ar\ out} \right) \right)}{\left(\frac{Q_{CDR\ in}}{\dot{m}_{CDR}} - \frac{Q_{CDR\ out}}{\dot{m}_{CDR}} - (w_{CDR\ in} - w_{CDR\ out}) * (h_{fg} + C_{p\ vap} * T_{ar\ out}) \right)} \quad (21)$$

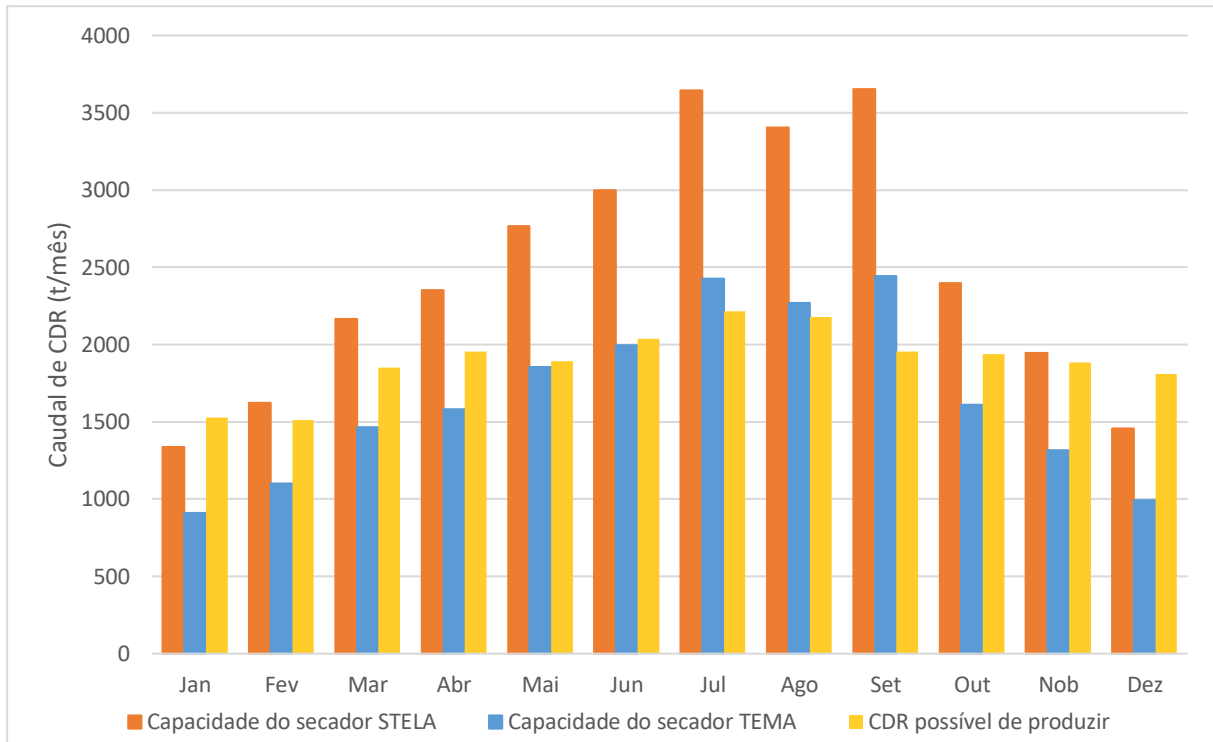


Figura 3.8: Comparação da variação do caudal de CDR entre os equipamentos e o possível de produzir.

É possível observar na Figura 3.8, que por vezes, o caudal de CDR possível de secar é superior ao existente. Isso indica que não é necessária essa quantidade de caudal de ar de secagem. Uma vez que o secador apenas tem um máximo de caudal de ar de secagem que está representado nas condições nominais, este pode descer para valores inferiores, e adaptar-se às condições necessárias. Para tal, através da equação (22), é possível determinar o caudal de ar de secagem necessário.

$$\dot{m}_{ar} = \frac{Q_{CDR\ in} - Q_{CDR\ out} - Q_{fg} - \left((\dot{m}_{H_2O\ CDR\ in} - \dot{m}_{H_2O\ CDR\ out}) * C_{p_{vap\ in}} * T_{arout} \right)}{(C_{p_{ar}} * T_{arout}) + (w_{ar\ in} * C_{p_{vap\ in}} * T_{arout}) - (C_{p_{ar}} * T_{arin}) - (w_{ar\ in} * C_{p_{vap\ out}} * T_{arin})} \quad (22)$$

Em resumo, na Figura 3.8, quando a capacidade do secador de secar CDR é inferior ao caudal disponível, o ar de secagem está a limitar a capacidade do secador. Caso a capacidade do secador seja superior, o caudal de CDR disponível é o limitador.

3.2.4. Fatores ambientais

Como já foi referido, certos fatores ambientais influenciam o processo de secagem. Estes fatores são obtidos através do *type 109*, que usa uma base de dados climáticos. Neste caso foram usados os dados climáticos de Évora do *Meteonorm*, porque é o local mais próximo do qual se encontra a possível instalação do sistema de secagem. A Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11, apresentam, respetivamente, a variação da temperatura e da humidade relativa/absoluta durante as horas de trabalho. Para uma melhor compreensão destas variações colocou-se o máximo, o mínimo, e a média de cada fator, em média mensal.

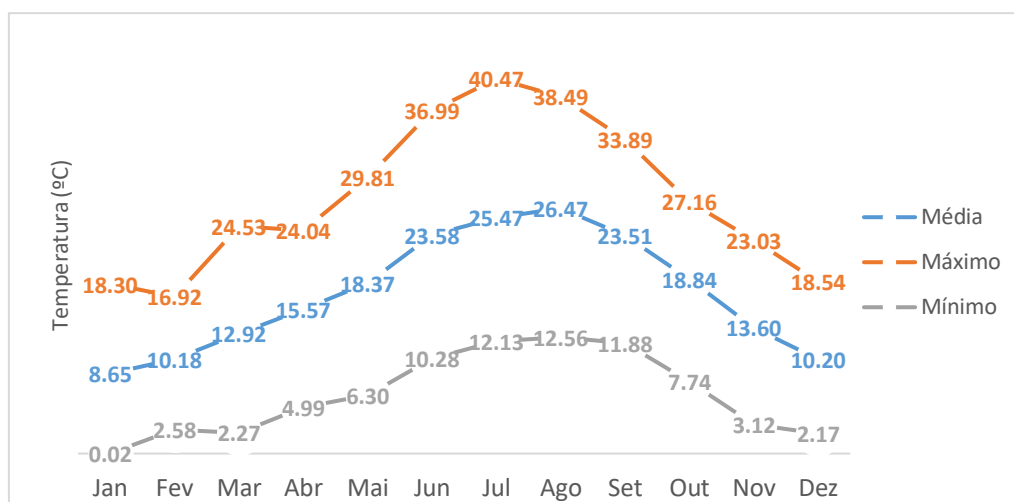


Figura 3.9: Variação da temperatura ao longo do ano.

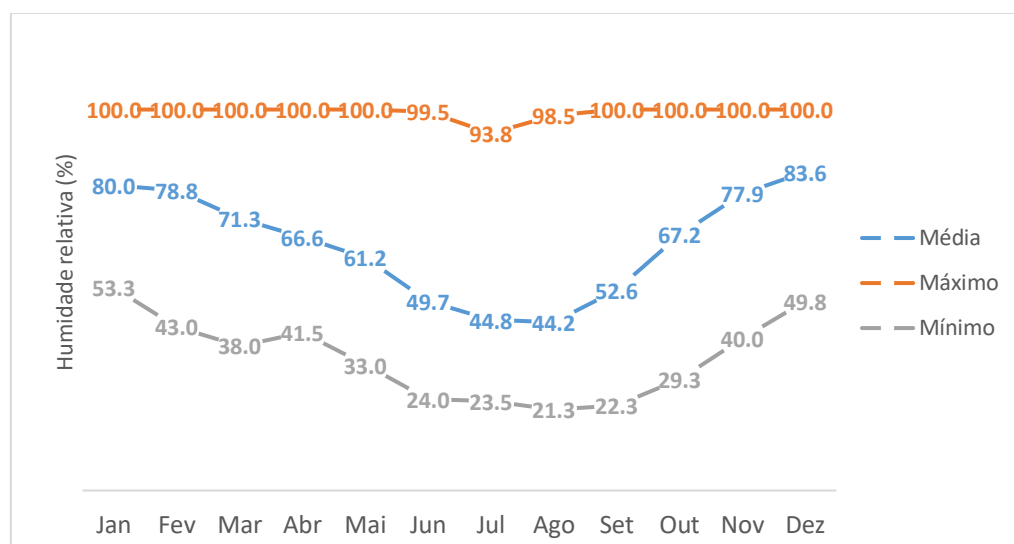


Figura 3.10: Variação da Humidade relativa ao longo do ano.

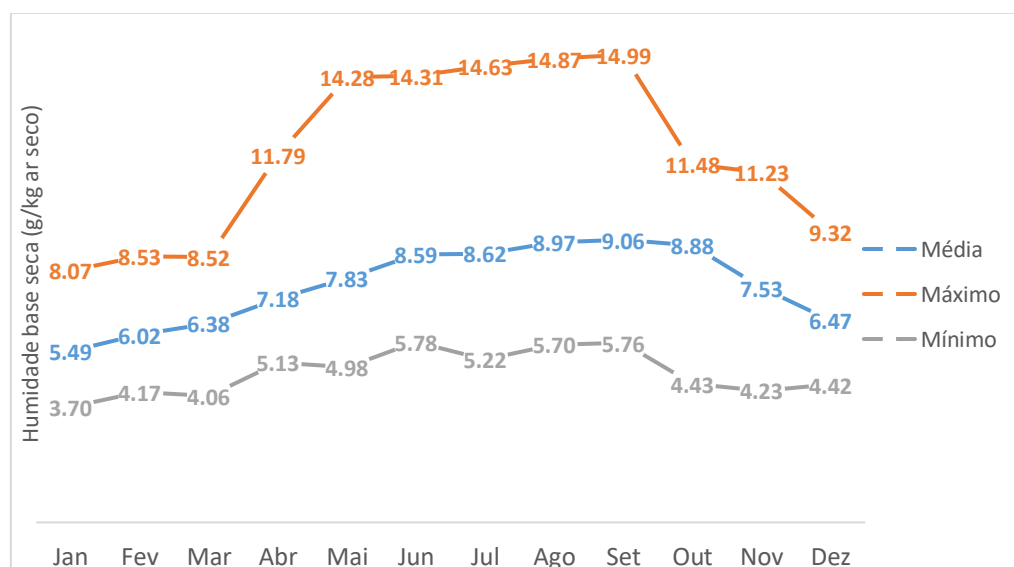


Figura 3.11: Variação da umidade absoluta na base seca ao longo do ano.

Através da Figura 3.12 e da Figura 3.13 é possível observar a variação do consumo de energia em função da temperatura e a humidade.

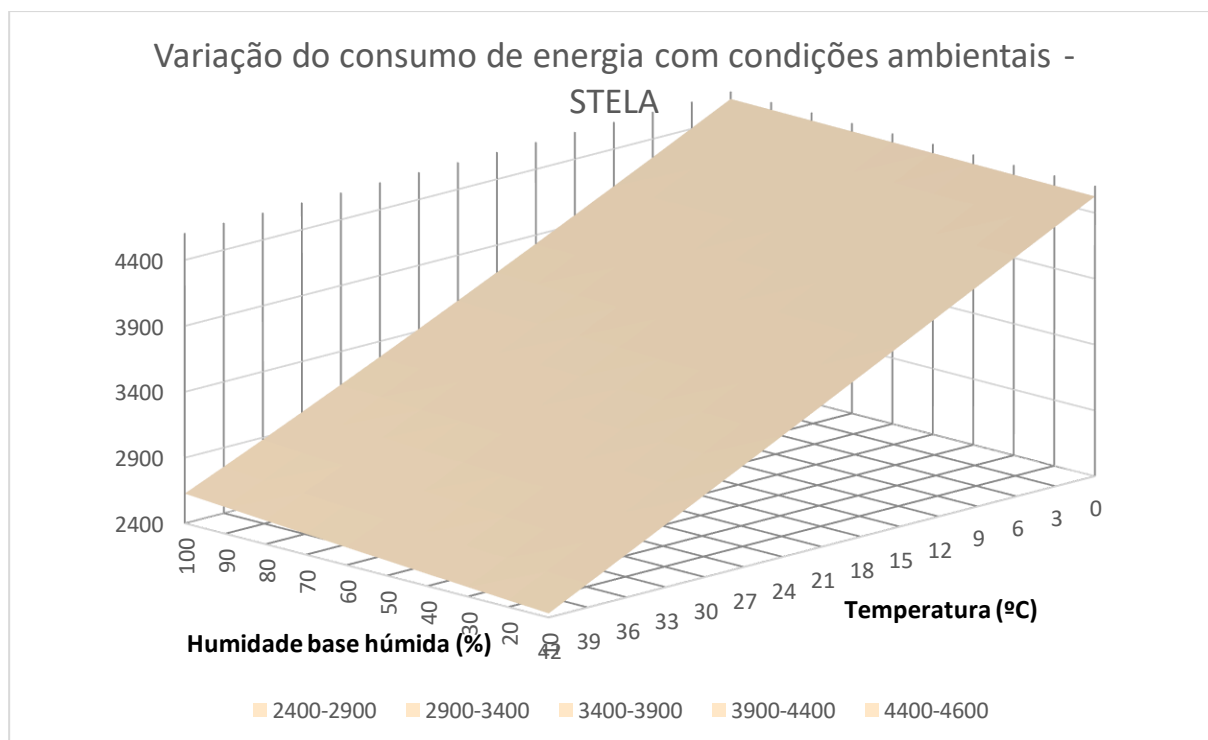


Figura 3.12: Variação do consumo de energia do secador STELA com a variação de fatores exteriores.

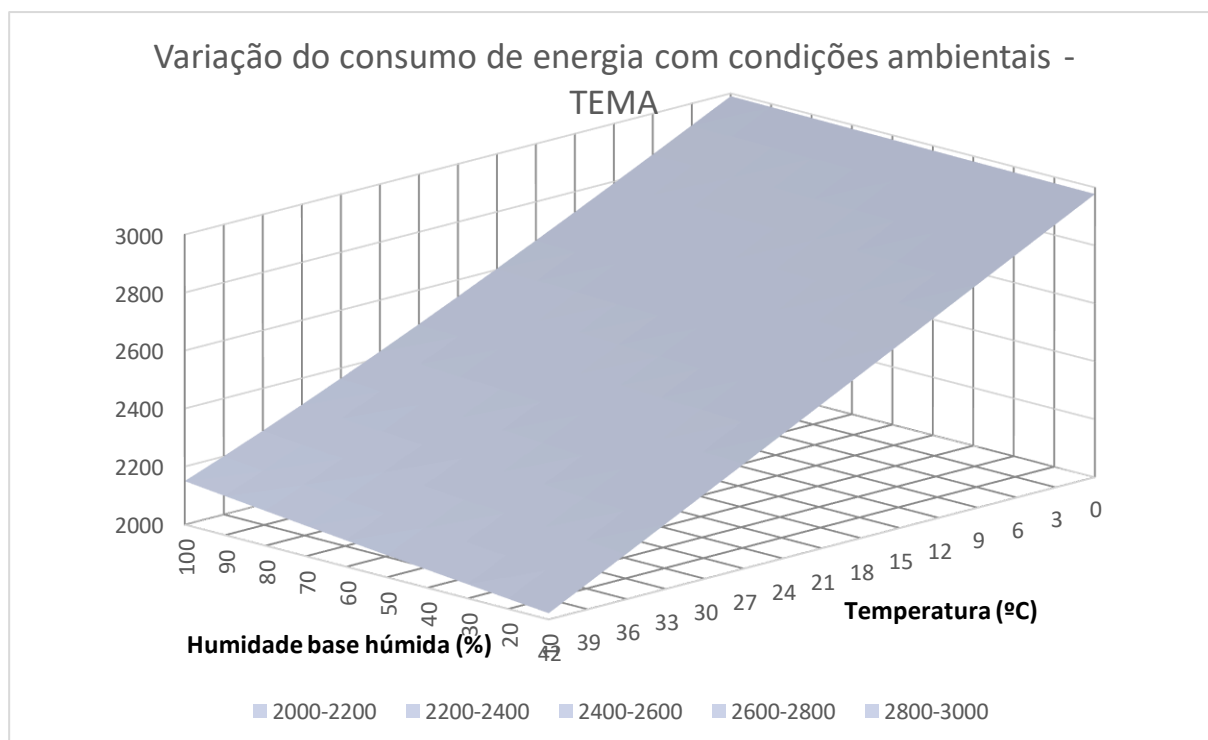


Figura 3.13: Variação do consumo de energia do secador TEMA com a variação de fatores exteriores.

3.3. Produção de energia (concentradores solares)

A tecnologia de coletor térmico adequada, depende da temperatura que é pretendido atingir. Para as temperaturas em questão, a torre solar e o disco parabólico, não se adequam, uma vez que atingem elevadas temperaturas. No caso do cilindro-parabólico e do refletor linear de Fresnel, estes podem ser utilizados para a gama de temperaturas do secador STELA ou do secador TEMA. No caso dos coletores CPC, que têm menor fator de concentração, nem todos têm capacidade para atingir a gama de temperaturas pretendidas para o secador TEMA.

As duas tecnologias de concentração solar que se podem usar nesta situação são os coletores lineares de Fresnel e os cilindro-parabólicos. Embora os coletores cilindro-parabólicos estejam mais disponíveis comercialmente, os de Fresnel também estão presentes no mercado. Mas uma vez que não foi encontrado um *software* que module os coletores de Fresnel, optou-se apenas por analisar os cilindro-parabólicos, que já estavam modelados em *software* TRNSYS. Poder-se-ia passar pela modelação do Fresnel utilizando o *software* TRNSYS, mas uma vez que essa ferramenta não existe no *software* utilizado, esse processo seria longo e demorado e fora do âmbito do presente trabalho.

Para selecionar os coletores cilindro-parabólicos, optou-se pelos quais eram possíveis modelar no *software* TRNSYS. Uma vez que o modelo utilizado no TRNSYS exige dados técnicos (eficiência, perdas, IAM, etc.) que não estão disponíveis, só foi possível obter a informação necessária para os coletores NEP polytrough 1800. A Figura 3.14 ilustra os coletores em questão.



Figura 3.14: Coletor cilindro-parabólico NEP polytrough 1800. [42]

3.3.1. Cálculos

Para determinar o desempenho dos coletores, foi utilizado o *type 536* da *TESS library* do TRNSYS, em conjunto com o *type 109* que vai ler a informação do *Meteonorm*, tornando-a acessível para o *type 536*. Através da Figura 3.15, é possível observar a energia disponível por mês.

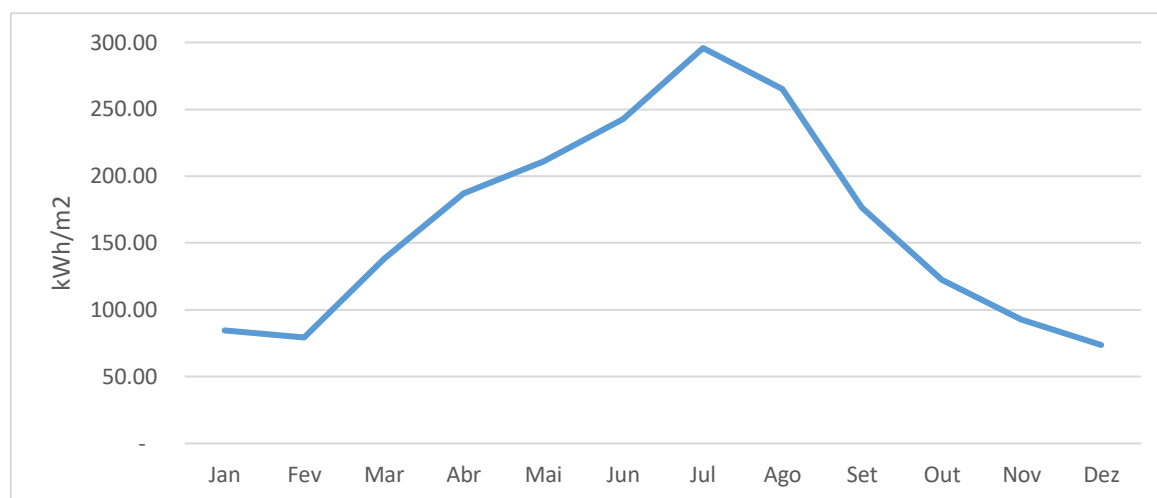


Figura 3.15: Energia disponível por mês.

Para avaliar estes coletores é necessário obter certos parâmetros, tais como a área do coletor, as eficiências $F_R U_L$ e $F_R(\tau\alpha)_n$, o modificador de ângulo, fator de concentração e o caudal de teste dos coletores. Nem todos estes parâmetros foram obtidos diretamente, sendo que foi necessário usar cálculos adicionais para os obter.

Relativamente ao coletor em estudo (NEP Polytrough 1800), obteve-se os seguintes dados [42][43]:

Comprimento (m)	11,085	$\eta_{0\text{ DNI}}$	0,689	Caudal mínimo (l/h)	900
Largura (m)	1,965	$\eta_{0\text{ G}}$	0,600	Caudal nominal (l/h)	1800
Área total (m²)	21,782	a_1 (W/K.m²)	0,36	Caudal máximo (l/h)	3600
Área de abertura (m²)	18,45	a_2 (W/K.m²)	0,0011	Caudal teste (l/h)	1400
Área de absorção (m²)	1,079				
Peso (kg)	700				

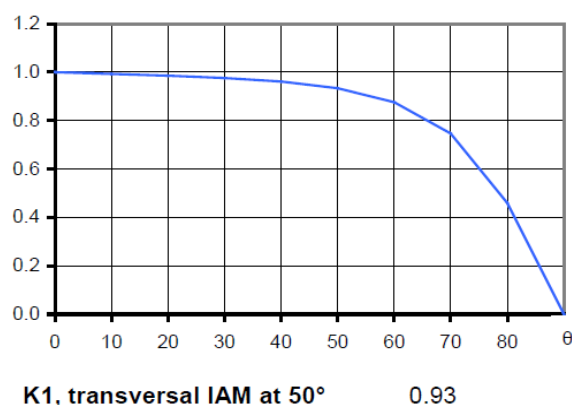


Figura 3.16: Curva do modificador de ângulo. [42]

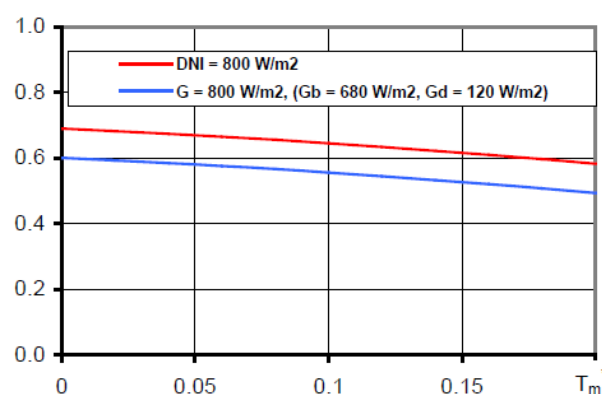


Figura 3.17: Curva da eficiência com a temperatura. [42]

A Figura 3.16 fornece os dados relativos do modificador de ângulo de incidência, que representa a variação do rendimento do coletor, em função da variação do ângulo de incidência da radiação solar no plano do coletor.

A partir dos dados da curva de eficiência é possível obter a equação da reta em que a ordenada na origem corresponde a $F_R(\tau\alpha)_n$ e o declive a $F_R U_L$ [44]. Esta curva de eficiência é determinada através da $\Delta T/G$ que está em função da temperatura média e ambiente, e para os parâmetros do TRNSYS, tem de ser em função da temperatura de entrada e ambiente. Através da equação (23) com os dados anteriores e com o DNI da Figura 3.17, Figura 3.16 é possível obter a eficiência dos coletores a diferentes diferenças de

temperatura, e determinar assim a equação da reta. Através da Figura 3.18, é possível observar a equação da reta.

$$\eta = \eta_{0\ DNI} - a_1 \frac{\Delta T}{G} - a_2 \frac{\Delta T^2}{G} \quad (23)$$

Onde:

- $\eta_{0\ DNI}$ Rendimento ótico para um dado DNI;
- a_1 e a_2 Coeficientes globais de perdas (W/K.m²);
- ΔT Diferença entre a temperatura média e a temperatura ambiente (K);
- G Irradiância no plano do coletor (W/m²).

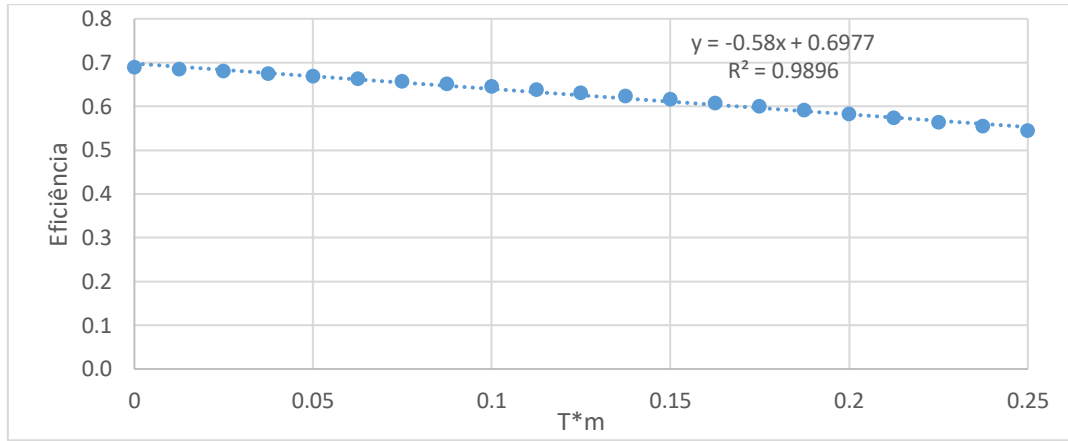


Figura 3.18: Curva de eficiência dos coletores NEP polytrough 1800.

Como já foi referido, esta equação está associada a $\Delta T/G$ da qual obtém-se $F_{médio}(\tau\alpha)_n$ e o $F_{médio}U_L$. Para converter para $F_R(\tau\alpha)_n$ e F_RU_L , é necessário recorrer às equações (24) e (25). [44][29]

$$F_R(\tau\alpha)_n = F_{médio}(\tau\alpha)_n \left(1 + \frac{A_c F_{médio} U_L}{2\dot{m}_{teste} C_{p\ H2O}} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$F_R U_L = F_{médio} U_L \left(1 + \frac{A_c F_{médio} U_L}{2\dot{m}_{teste} C_{p\ H2O}} \right)^{-1} \quad (25)$$

Onde:

- $F_{médio}(\tau\alpha)_n$ Eficiência média com que a radiação é absorvida pelo coletor e removida pelo fluxo;
- $F_{médio}U_L$ Razão das perdas médias do coletor;
- \dot{m}_{teste} Caudal teste (l/h);
- A_c Área de abertura do coletor (m²).

Através da equação da reta da Figura 3.18, é possível concluir que $F_{médio}(\tau\alpha)_n = 0,6977$ e que $F_{médio}U_L = 0,58$. Pelas equações (24) e (25) obtemos $F_R(\tau\alpha)_n = 0,6954$ e $F_RU_L = 0,5781$. Importante referir que o F_RU_L usado no *type* da simulação, requer um tratamento adicional. Isto porque o valor determinado está em função da área de abertura, mas no *type* este valor está em função da área do absorvedor, pelo que para corrigir este valor basta multiplicar pelo fator de concentração do coletor. Se esta operação não fosse realizada, a eficiência do coletor seria superior à real.

Uma vez determinados os parâmetros dos coletores a utilizar, foi necessário determinar a área onde vão ser implementados, sendo que existem duas possíveis. Foi utilizado a área do telhado do armazém, de forma a utilizar espaço já ocupado, e a área de um descampado. Também pode ser avaliada a junção das duas áreas.

Para a disposição dos coletores, também é importante referir que em todas as situações, estão alinhados com o eixo Norte-Sul, uma vez que produzem mais energia, anualmente. De acordo com [31], para coletores cilindro parabólicos a distância entre as filas tem de ser, no mínimo, três vezes a largura do coletor. Sendo que os coletores têm 1,965 m de largura, estes têm de estar a uma distância de 5,535 m, que é representado na Figura 3.19. A Tabela 3.5 mostra os dados relativos às áreas escolhidas, e a Figura 3.20 mostra as áreas de implementação dos coletores.

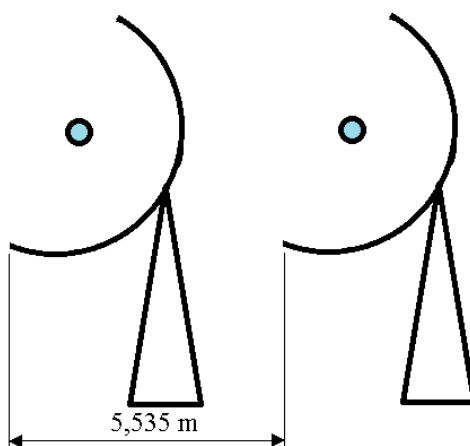


Figura 3.19: Representação da distância entre coletores.

Tabela 3.5: Dados relativos ao campo solar.

Local	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m ²)
Descampado (CS1)	74	74	5476
Telhado (CS2)	144	61	8784

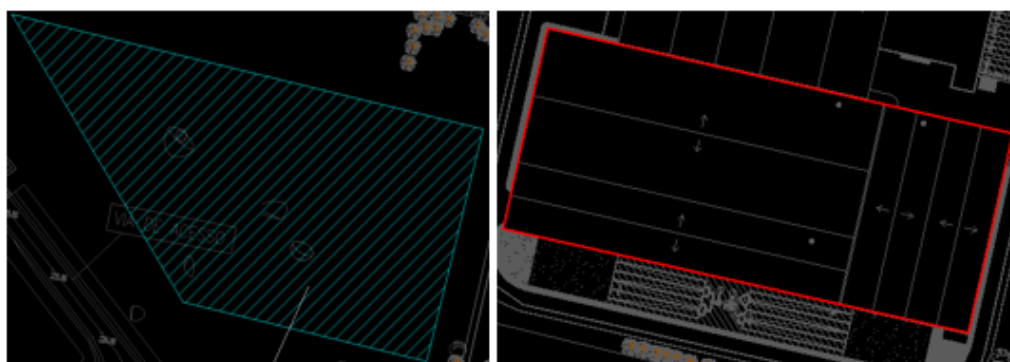


Figura 3.20: Ilustração da área de coletores no descampado (esquerda), e da área de coletores no telhado (direita).

O número de coletores em série ou em paralelo depende do rearranjo atribuído aos coletores. Ou seja mesmo ocupando o número máximo de coletores em série ao longo da área, é possível dobrar o número de coletores em paralelo se reduzirmos para metade o número de coletores em série, o importante é que em todas as séries o fluido percorra a mesma distância. Ao colocar mais coletores em paralelo, permite a circulação de mais fluido, mas ao reduzir os coletores em série baixa a temperatura a que o fluido sai. A Figura 3.21, representa duas possíveis configurações do campo solar no descampado.

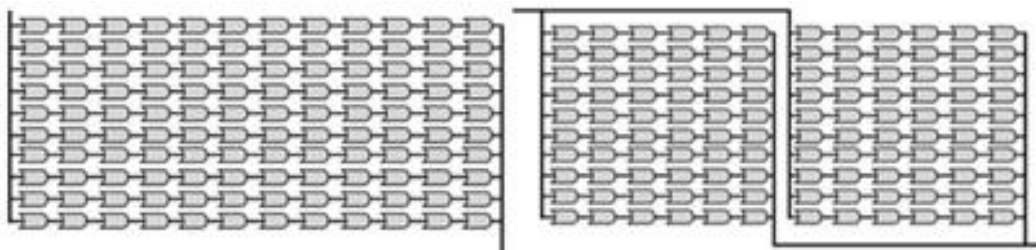


Figura 3.21: Representação esquemática do campo de coletores no descampado.

Uma vez que as necessidades não são constantes ao longo do ano, assim o caudal de água a circular também não é. Sendo que os coletores têm um caudal máximo e mínimo, o número de coletores em paralelo, não pode ser suficientemente grande de maneira a que o caudal fique inferior ao mínimo dos coletores, nem suficientemente baixo de maneira a que o caudal exceda o máximo dos coletores.

Para esta situação optou-se por um caudal de 2700 l/h, que representa mais 50% que o caudal nominal [42]. Foi escolhido este caudal de forma a que se reduza a necessidade do número de coletores em paralelo, e para o caudal não estar à carga máxima do coletor. O número de coletores em paralelo, escolhido para cada simulação, é o máximo para que o caudal não fique abaixo do mínimo definido no coletor. Dificilmente o caudal excede por coletor os 2700 l/h atribuídos, mas caso exceda, é desviado e misturado com o caudal proveniente dos coletores, antes de entrar no sistema auxiliar.

3.4. Produção de energia (sistema auxiliar)

Num sistema ideal, este equipamento não seria necessário, se o campo solar tivesse capacidade de fornecer a energia necessária, e o seu não funcionamento por avarias ou outras razões não tivesse importância. Uma vez que a área de coletores disponível é limitada, é necessário que o sistema auxiliar utilize combustível, para compensar a insuficiência do campo solar. Uma vez que estamos num aterro sanitário com produção de biogás, este poderá ter utilidade.

Na Tabela 3.6, é possível comparar a composição do biogás [45][46] com a composição do gás natural [47], sendo que o biogás não tem uma composição fixa, e onde as quantidades de CH₄, N₂ e CO₂ (principalmente) variam conforme o resíduo. Para tal, escolheu-se a composição de biogás pobre em termos energéticos. Para além dos três compostos referidos anteriormente, o biogás também contém compostos residuais que podem ser necessários retirar, como por exemplo o caso do H₂S. Isto porque estes compostos podem danificar os equipamentos, pois podem tornar-se corrosivos.

Tabela 3.6: Características do biogás e do gás natural.

Composto	Biogás	Gás Natural	Elemento	Biogás	Gás Natural
Metano %(V/V)	45	76	C %(V/V)	35,17	68,65
Etano %(V/V)	-	8	H %(V/V)	6,25	20,04
Propano %(V/V)	-	3,3	N ₂ %(V/V)	14,48	8,44
Butano %(V/V)	-	4,4	O ₂ %(V/V)	44,09	2,86
CO ₂ %(V/V)	40	1,9	S %(V/V)	0,01	-
N ₂ %(V/V)	15	6,4	PCI (kJ/kg)	12307	48850
H ₂ O %(V/V)	-	-	ρ (kg/m ³)	1,3	0,817
H ₂ S %(V/V)	100 ppm	-			
NH ₃ %(V/V)	5 ppm	-			

O biogás pode ser extraído do aterro sanitário, com uma eficiência que por norma pode variar entre 75% e 85% [48]. O biogás pode, ou não, ser usado diretamente em um equipamento de combustão, dependendo da informação do fabricante. Existem equipamentos de cogeração que aceitam biogás como combustível, mas uma vez que no sistema não é necessária energia elétrica, é mais rentável usar um sistema que utiliza o máximo possível do poder calorífico do combustível para produzir calor. Embora certos equipamentos de combustão não possam aceitar o biogás devido a compostos corrosivos com o H_2S , o biogás pode ser purificado, ou “upgrading”, obtendo assim biometano.

O biogás tem vantagens económicas em relação ao gás natural, e em termos legislativos tem vantagens em relação à poluição ambiental, uma vez que de acordo com o Despacho n.º: 17313/2008, as emissões do biogás são nulas, e de acordo com Directiva 2009/28/CE, 73 % das emissões não são contabilizadas. Esta redução oferecida pela legislação está relacionada com o facto do CO_2 não provir de combustíveis fósseis, e do ciclo do carbono ser mais curto. Mas com ou sem legislação, a emissão de CO_2 continua a existir, sendo que em engenharia a sua quantificação deve ser feita.

em termos físicos isso não acontece, pois, a emissão de CO_2 continua a existir com ou sem legislação.

Existem diferentes tecnologias de “upgrading” do biogás, que dependendo da tecnologia podem remover mais do que um composto indesejado. Existe o “Pressure Swing Adsorption (PSA)”, onde os contaminantes são adsorvidos por materiais porosos sob pressão; o “Water Scrubbing” onde o biogás é injetado contra uma coluna de água, e os contaminantes são absorvidos por ela; o “Chemical Scrubbing” e o “Physical Scrubbing”, que removem os contaminantes com químicos ou solventes. Ou por criogenia onde os contaminantes congelam conforme a temperatura desce. De todas as tecnologias disponíveis o “Water Scrubbing” é a que permite uma maior variação de remoção de contaminantes, tem menos perdas, e é das mais baratas. A Tabela 3.7, permite comparar as diferentes tecnologias. [49]

Tabela 3.7: Comparação de algumas características dos processos de upgrading. [49][50]

	PSA	Water Scrubbing	Physical Scrubbing	Chemical Scrubbing
Perdas de CH_4 (%)	<3	<1	2-4	<0,1
Quantidade de CH_4 (%)	96	97	96	99
Aquecimento	Não	Não	Sim	Sim
Pré-tratamento do biogás	Sim	Não	Não	Sim

Uma vez que as necessidades são elevadas, e o sistema auxiliar vai responder a parte ou ao total delas, pode ser economicamente vantajoso, aproveitar a energia dos gases quentes da combustão, e aumentar a eficiência do sistema auxiliar. A utilização dos gases de combustão, pode ser feita de diversas formas, sendo que, numa das soluções, os gases de combustão podem ser diluídos no ar de entrada do secador, permitindo uma redução do caudal de ar e água no permutador, e consequentemente consumir menos energia.

O maior problema desta solução é que o ar dos gases de combustão estará mais húmido, o que pode ser desvantajoso para o processo, dependendo da relação dos gases de combustão no ar de secagem. Caso a quantidade de gases de combustão seja elevada, o ar de secagem entra com uma humidade elevada, e reduz assim a capacidade do ar de remover a água do CDR. Para se poder estudar a utilização de gases de combustão, tem que se definir que quantidade de energia do sistema auxiliar vai para a água, para os gases de combustão e as restantes perdas que não são possíveis de aproveitar. Ou seja, a eficiência do sistema auxiliar.

Para o sistema auxiliar utilizado, foi considerado uma eficiência de 84 % da caldeira, 11 % de perdas pelos gases de combustão, e 5 % de perdas impossíveis, ou muito difíceis de aproveitar.

3.4.1. Cálculos

A quantidade de gases de combustão varia com o caudal de combustível e com o excesso de ar, ou seja, primeiro temos de determinar o caudal de combustível, e depois pode-se determinar o caudal dos gases de combustão. Para tal resolve-se as equações seguintes em ordem ao caudal de combustível.

Optou-se pela solução em que os gases de combustão vão ser misturados com o ar de secagem, antes de entrar no permutador. Isto permite que o mesmo caudal de ar secagem seja admitido a uma temperatura superior no permutador, reduzindo assim o caudal de água necessário para aquecer o ar de secagem para a temperatura exigida pelo equipamento. Caso fosse possível misturar os gases de combustão depois do permutador, o caudal de ar a aquecer era menor, mas à temperatura ambiente e os gases de combustão teriam que estar à temperatura de secagem, o que implicaria que essa temperatura a sair do sistema auxiliar fosse gerida com o excesso de ar no sistema auxiliar.

Para determinar o combustível e com \dot{m}_{ar} conhecido, substitui-se na equação (26) as variáveis pela equação (27) e (31). Na equação (27), o \dot{m}_{H_2O} pode ser determinado pela equação (29), e na equação (28), a ΔT_{gc} poder ser determinada pela equação (30). O $C_{p_{mix}}$ na equação (28), é determinado através da equação (32).

$$\dot{m}_{ar} = \dot{m}_{ar p} + \dot{m}_{gc} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{ar p} = \frac{C_{p_{H_2O}} * \dot{m}_{H_2O} * \Delta T_{H_2O}}{(C_{p_{ar}} + w_{ar in} * C_{p_{vap}}) \Delta T_{ar p}} \quad (27)$$

$$T_{mix} = \frac{\dot{m}_{gc} * \Delta T_{gc} * C_{p_{gc}} + \dot{m}_{ar p} * \Delta T_{ar p} * C_{p_{ar}}}{(\dot{m}_{gc} + \dot{m}_{ar p}) C_{p_{mix}}} \quad (28)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{fuel} * PCI * \frac{\%E_{H_2O}}{100}}{C_{p_{H_2O}} * T_{H_2O in}} \quad (29)$$

$$\Delta T_{gc} = \frac{\frac{\%E_{gc}}{100} * \dot{m}_{fuel} * PCI}{\dot{m}_{gc} (C_{p_{gc}} + w_{gc})} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{gc} = ((1 + e)m_{ar seco} + 1)\dot{m}_{fuel} \quad (31)$$

$$C_{p_{mix}} = \frac{\dot{m}_{gc} * C_{p_{gc}} + \dot{m}_{ar p} * C_{p_{ar}}}{(\dot{m}_{gc} + \dot{m}_{ar p})} \quad (32)$$

Onde:

$\dot{m}_{ar p}$	Caudal de ar que passa no permutador (kg/s);
\dot{m}_{gc}	Caudal dos gases de combustão (kg/s);
$\Delta T_{ar p}$	Diferença da temperatura do ar de secagem antes e depois de aquecer no permutador (K);
$\dot{m}_{gc+argc}$	Caudal de gases de combustão e caudal de ar para manter para $T_{gc} = T_{mix}$ (kg/s);
ΔT_{H_2O}	Diferença de temperatura da água entre a entrada e a saída do permutador (K);
ΔT_{gc}	Variação da temperatura dos gases de combustão (K);
ΔT_{argc}	Variação da temperatura do ar adicional antes e depois da mistura com o \dot{m}_{gc} (K);
T_{mix}	Temperatura a qual os gases de combustão com o ar entram no secador (K);
\dot{m}_{argc}	Caudal de ar adicional nos gases de combustão (kg/s);
PCI	Poder calorífico inferior (kJ/kg);

\dot{m}_{fuel}	Caudal de combustível (kg/s);
$\%E_{H_2O}$	Percentagem da energia produzida que vai para a água;
$\%E_{gc}$	Percentagem da energia produzida que vai para os gases de combustão;
$m_{ar\ seco}$	Caudal mássico específico do ar seco (kg/kg _{combustível});
$C_{p_{gc}}$	Calor específico dos gases de combustão;
$C_{p_{mix}}$	Calor específico da mistura dos gases de combustão com o ar do permutador;
w_{gc}	Humidade nos gases de combustão (kg/kg _{combustível}).

Posteriormente, com o \dot{m}_{fuel} determinado, é possível calcular as outras variáveis, tais como o \dot{m}_{H_2O} e o \dot{m}_{gc} .

Para estes cálculos, é necessário determinar certos parâmetros do combustível. Uma vez que a atmosfera tem uma composição aproximada de 79,05% de N₂, e 20,95% de O₂, a sua relação é de 3,7733 mol de N₂/ mol de O₂, obtendo-se assim 137,7 kg/kmol.

Numa combustão estequiométrica, $C_nH_mN_oO_pS_q + e(O_2 + yN_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cN_2 + dSO_2$. Em que $a=n$, $2b=m$, $c=o/2+y$, $g=a+b/2-p$, e $d=q$. Isto aplica-se para todos os combustíveis, sendo que podem ter adição de mais composto ou menos dependendo da composição do combustível.

Relativamente aos compostos emitidos pela queima dos combustíveis, a quantidade de água é determinada através da equação (33), a quantidade de CO₂ é determinada através da equação (34) e por fim, a quantidade de SO₂ pode se determinada através da equação (35). Seguidamente, multiplicando as equações anteriores pelo \dot{m}_{fuel} , obtém-se a quantidade de cada composto emitido.

O PCI do biometano pode ser determinado através da equação (35).

$$m_{H_2O} = (M[H] * 2 + M[O]) * b \text{ (kg/ kg de combustível)} \quad (33)$$

$$m_{CO_2} = (M[C] + M[O] * 2) * a + m_{CO_2\ no\ GN} \text{ (kg/ kg de combustível)} \quad (34)$$

$$m_{SO_2} = (M[S] + M[O] * 2) * q \text{ (kg/ kg de combustível)} \quad (35)$$

$$PCI = 32,79 * \%C + 120,91 * \left(\%H - \% \frac{O}{8} \right) + 9,28 * \%S - 2,33 * \%Humidade \quad (36)$$

Onde:

M Massa molar do elemento (g/mol);



Figura 3.22: Exemplo de uma caldeira Bosch.

3.5. Sistema de controlo

Para que não haja desperdícios, é necessário informar diferentes equipamentos, quando devem funcionar e a que capacidade. Esta informação pode ser dada ao sistema auxiliar, campo de coletores, bomba de circulação, e ao ventilador do secador.

Para controlar o sistema auxiliar, é necessário informar o caudal e a que temperatura de entrada da água. Sabendo que o caudal de água na saída será o mesmo e a temperatura de saída fixa, é possível criar um sinal entre 0 e 1 que determina a potência do sistema auxiliar. Neste caso usou-se um *type* que tem três entradas, o valor mínimo, máximo e o atual.

A utilização de um campo de coletores maior implica a utilização de tubagens mais longas, e ao aproveitar toda a radiação, implica a circulação da água pelas tubagens longas, e pelo campo solar, em horas em que as perdas são superiores aos ganhos dos coletores. Para tal foi necessário determinar com que DNI a energia produzida pelo campo de coletores é superior à perda de energia. Realizou-se várias simulações, para obter a energia térmica produzida, com a água a circular pelo campo solar e tubagens, a diferentes valores de DNI a que o campo solar entra em funcionamento.

Os valores de energia térmica produzida, foram obtidos com intervalos de DNI de 25 kJ/hm^2 , desde o 0 até 175 kJ/hm^2 . Para verificar com que DNI compensa usar o campo solar, determinou-se com que DNI o sistema auxiliar fornece menos energia térmica (diferença entre a energia térmica necessária e a produzida na respetiva DNI). Já no caso do campo solar determinou-se com que DNI produz mais energia térmica (diferença entre a máxima energia térmica produzida, com a energia produzida na respetiva DNI), ou seja, o valor mais baixo indica quando campo solar produziu mais energia. Através da Figura 3.23, Figura 3.24 e Figura 3.25, é possível observar esse efeito. De referir que CS3 corresponde à junção da área CS1 e CS2.

Através dos gráficos, é possível observar que ao aproveitar baixas DNI's, o campo solar produz menos. Isto porque a energia que o campo está a aproveitar não é suficiente para compensar as suas perdas. O campo solar, com baixas DNI's faz com que o fluido térmico perca a energia que transporta ao ter que circular pelo campo de coletores e pelas longas tubagens. Outra situação observável, é que o mínimo de produção de energia pelo sistema auxiliar nem sempre corresponde ao máximo produzido pelo campo solar. Esse efeito é mais visível em campos solares com menos área implementada. Isso acontece porque, embora o campo solar tenha capacidade para compensar as suas perdas, este não tem capacidade para compensar as perdas das tubagens.

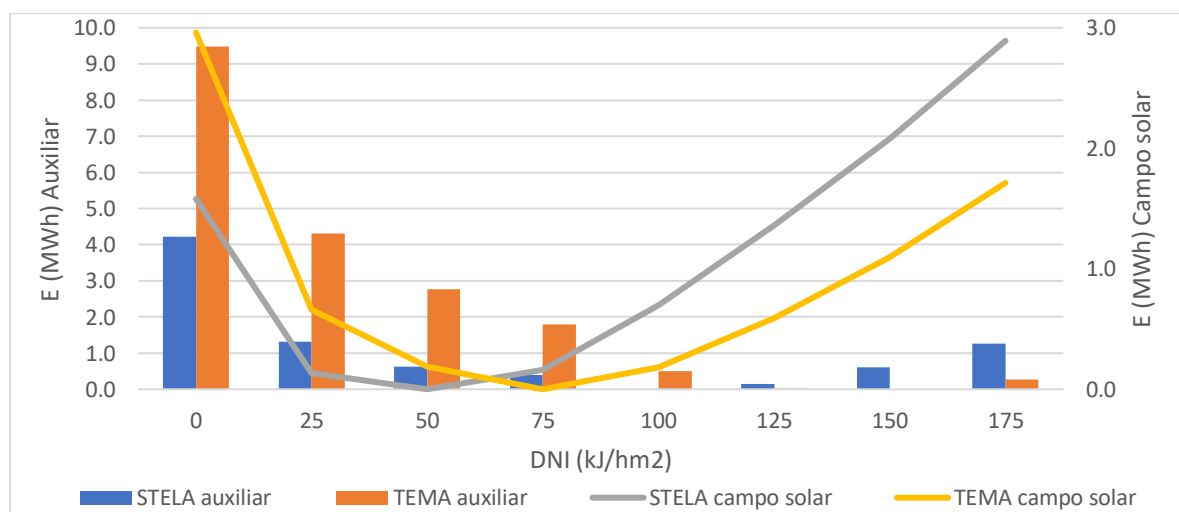


Figura 3.23: Variação das produções de energia para as simulações com CS1.

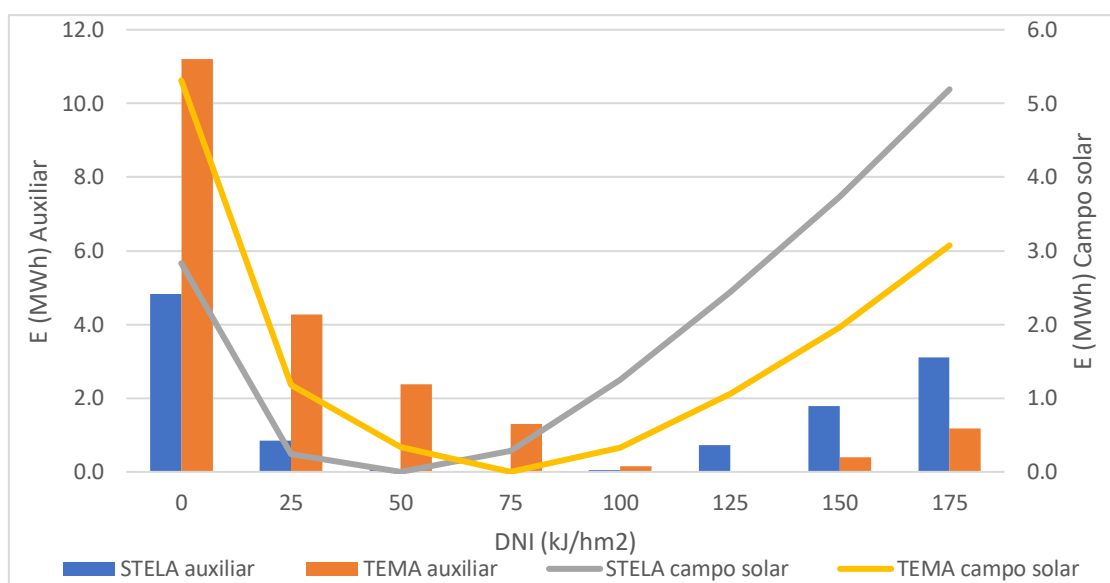


Figura 3.24: Variação das produções de energia para as simulações com CS2.

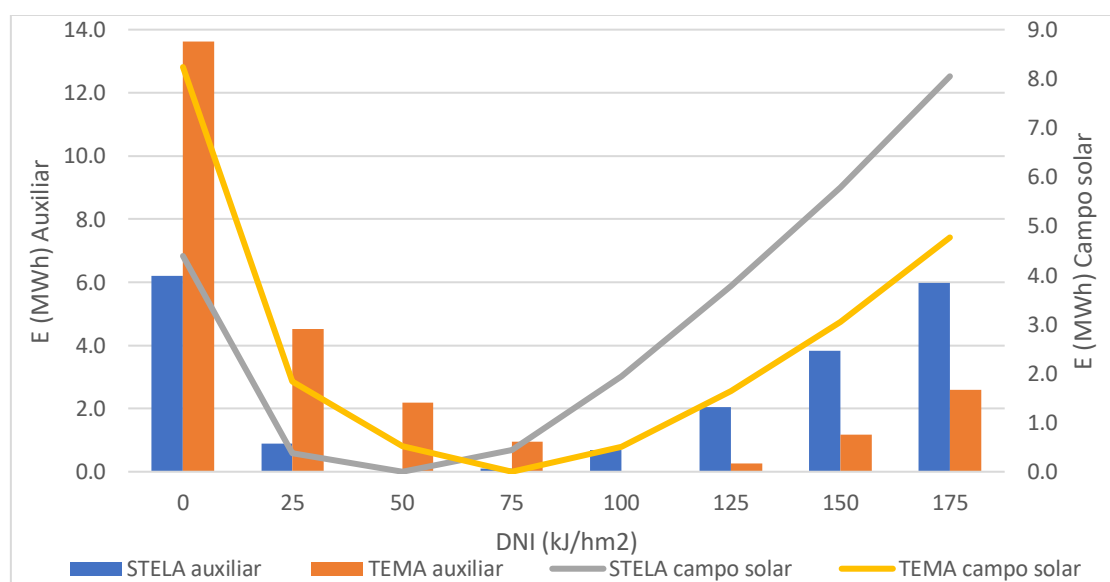


Figura 3.25: Variação das produções de energia para as simulações com CS3.

Para se obter mais fração solar no sistema, poderá passar por escolher uma DNI onde o campo solar tem menos perdas. Mas por questões financeiras, opta-se por uma DNI em que o sistema auxiliar precisa de produzir menos energia. Através da Tabela 3.8, é possível observar a partir de que DNI o sistema auxiliar tem o mínimo de energia produzida e o campo solar apresenta a produção máxima de energia.

Tabela 3.8: DNI a partir de onde o sistema auxiliar tem produção mínima, e o campo solar produção máxima.

Equipamento	Campo solar	DNI (kJ/hm ²)	
		Auxiliar	Campo solar
STELA	CS1	100	50
	CS2	75	50
	CS3	50	50
TEMA	CS1	150	75
	CS2	125	75
	CS3	100	75

Relativamente ao controlo da bomba, o caudal necessário é fornecido diretamente através de equações de balanços de massa e energia. Por fim a potência do ventilador é variada até a um máximo, que corresponde ao definido nas condições nominais. Sendo assim, nos balanços de massa e de energia, determina-se o caudal de ar em função do caudal de CDR existente, e caso o caudal de CDR seja a capacidade máxima do secador, este vai corresponder ao caudal máximo de ar, pois o caudal máximo de CDR já foi determinado em função do caudal máximo de ar.

3.6. Tubagens e bombas

O diâmetro das tubagens e a potência da bomba, têm de ser determinadas em função do caudal máximo necessário. Uma vez que ambos os secadores têm caudais diferentes, não é necessário que as tubagens e a bomba sejam os mesmos para os dois secadores. Para determinar o diâmetro mínimo das tubagens consultou-se [51], que indica uma velocidade máxima de acordo com o número de horas de funcionamento, para evitar problemas com a erosão. Sendo que por ano os sistemas funcionam 3250 horas, no máximo a velocidade pode ser de 3,7 m/s. Através da velocidade máxima, e do caudal necessário, é possível obter o diâmetro que as tubagens têm de ter, através da equação (37).

$$D = 2 * \sqrt{\frac{\text{Caudal}/\text{Velocidade}}{\pi}} \quad (37)$$

Assim com o diâmetro mínimo determinado, foi consultado[52], para obter uma tubagem que se adeque ao sistema. Para simular as tubagens, foi utilizado o *type 709*, para o qual foi necessário, vários tipos de informação, não só relativo às tubagens, mas ao fluido também, que podem ser observados na Tabela 3.9. Os dados relativos à água e ao cobre foram obtidos de [41]. Para evitar a mudança de estado da água a 140 °C, é necessário aumentar a pressão para 3,614 Bar. Já para o isolamento, através de [53] foi possível obter uma equação da reta que se ajusta ao comportamento da condutividade e a sua espessura foi obtida de [52]. Através da Figura 3.26, é possível observar esse comportamento.

Tabela 3.9: Dados necessários para as tubagens.

		Temperatura (°C)		
		70	100	140
Água	C_p (kJ/kgK)	4,191	4,217	4,278
	μ_f (Ns/m ²)	0,000389	0,000279	0,0002
	ρ (kg/m ³)	976,56	957,85	928,51
	k_f (W/mK)	0,664	0,68	0,688
Cobre	k (W/mK)		393	
Isolamento	k (W/mK)	0,0387	0,0421	0,0471

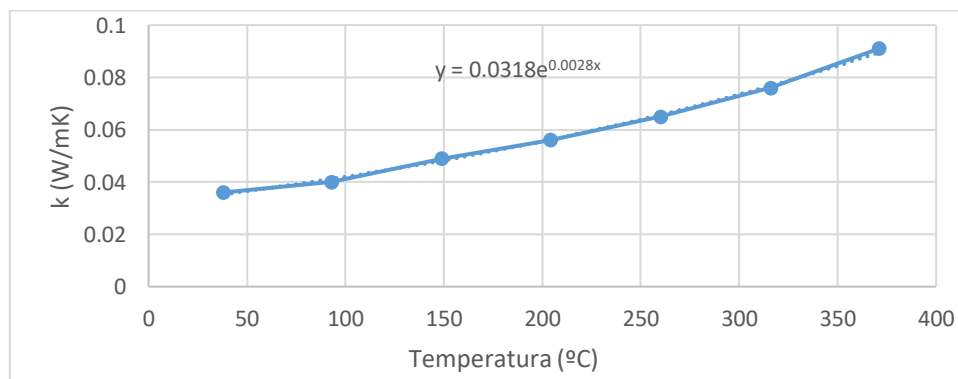


Figura 3.26: Variação da condutividade do isolamento com a temperatura.

Adicionalmente o *type* 709 requer a transferência de calor por convecção com o exterior. Foram estimadas as perdas térmicas por condução, assumindo uma temperatura exterior do isolamento e a temperatura ambiente. Através da equação (38) [55] foram estimadas as perdas térmicas por condução. De seguida, através da equação (41) [55], determina-se a temperatura de superfície da tubagem. Por fim através da equação (45) [56], determina-se o coeficiente de perdas térmicas por convecção.

$$q = \pi(T_f - T_a) / \frac{\ln(D_e/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_s D_e} \quad (38)$$

$$h_s = 13,79 + 0,03232\Delta T_s - 40,86D_e + 0,0001117\Delta T_s^2 + 97,3D_e^2 - 0,01388\Delta T_s D_e \quad (39)$$

$$\Delta T_s = T_s - T_a \quad (40)$$

$$T_{ext} = T_f - q * \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi k} \quad (41)$$

$$Gr = \frac{D_e^3 * \rho^2 * g * (T_{ext} - T_a) * \beta}{\mu^2} \quad (42)$$

$$Ra = Gr * Pr \quad (43)$$

$$Nu = \left(0,6 + \frac{0,387 * Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(0,559/Pr \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (44)$$

$$h = Nu * \frac{k}{D_e} \quad (45)$$

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (46)$$

$$T_m = \frac{T_{ext} + T_a}{2} \quad (47)$$

Onde:

- T_f Temperatura da água (K);
- T_a Temperatura ambiente (K);
- T_s Temperatura estimada da superfície exterior (K);
- T_{ext} Temperatura da superfície exterior (K);
- q Perdas térmicas por condução (W/m);
- D_e Diâmetro exterior da tubagem (m);
- D_i Diâmetro interior da tubagem (m);
- h_s Coeficiente de transferência de calor do isolamento (W/m².K);
- k Condutividade do isolamento (W/m.K);
- ρ Massa volúmica do ar (kg/m³);
- g Aceleração da gravidade (m/s²);
- β Coeficiente de expansão do ar (K⁻¹);
- μ Viscosidade do ar (Ns/m²);
- Pr Número de Prandtl.
- Nu Número de Nusselt
- Ra Número de Raleigh
- Gr Número de Grashoff
- h Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K);

Através da Tabela 3.10, é possível observar os dados utilizados para a determinação do coeficiente de perdas por convecção h_1 e h_2 , e o seu valor.

Tabela 3.10: Dados para determinação do coeficiente de convecção, e o seu resultado.

	D_e (m)	D_i (m)	T_{f1} (°C)	T_{f2} (°C)	T_a (°C)	T_{s1} (°C)	T_{s2} (°C)	T_{ext1} (°C)	T_{ext2} (°C)	h_1 (W/m ² K)	h_2 (W/m ² K)
STELA	0,208	0,108	70	100	20	24	35	22,80	24,81	2,34	2,73
TEMA	0,169	0,089	100	140	20	35	48	25,85	29,62	2,97	3,43

Para determinar a bomba a utilizar, foi consultado o catálogo [54], de onde se selecionou uma bomba para cada sistema com capacidade para fornecer o caudal necessário. Para bomba foi usado o *type* 110.

3.7. Armazenamento de CDR

A quantidade de CDR a armazenar, corresponde à quantidade de CDR que os secadores não conseguem secar nos meses mais húmidos, e a quantidade de CDR que o secador é capaz de secar nos meses mais secos. Por exemplo, durante o Inverno o CDR tem mais humidade e as temperaturas mais baixas, o que pode implicar que o secador não seja capaz de secar todo o CDR disponível. Pelo contrário, no Verão o CDR está mais seco e as temperaturas mais elevadas, o que pode implicar que o secador possa aceitar uma maior quantidade de CDR para além da disponível. Sendo assim a quantidade a armazenar pode variar de secador para secador.

Esta análise serve apenas para se ter uma noção, do que é necessário e do que poderá estar disponível, uma vez que é possível fazer vários rearranjos de forma a ser possível armazenar o que é necessário.

Relativamente à quantidade de CDR possível de armazenar, existem vários fatores que influenciam essa possibilidade, nomeadamente a densidade do CDR, a área disponível, e como o CDR é armazenado.

Para o armazenamento, existe uma área disponível de 361 m². Neste armazém o CDR é disposto em fileiras, para ser remexido por uma pá-carregadora, que atinge uma altura máxima de 3,5 m. Adicionalmente assumiu-se que a pilha apenas pode ter um ângulo de 29° [57], e para que a pá-carregadora se possa movimentar foi determinado duas filas com 8 m de largura cada. Sendo assim através da equação (48) determinou-se a altura da pilha, e através da equação (49) determinou-se o volume da pilha. Relativamente à densidade, foi assumido um valor de 600 kg/m³, isto porque o CDR é triturado e encontra-se dentro dos valores de outras bibliografias [35][58].

$$\text{Altura da pilha(m)} = \tan(\text{ângulo da pilha}) * \frac{\text{largura da pilha}}{2} \quad (48)$$

$$\text{Volume da pilha (m}^3\text{)} = \text{comprimento} * \text{largura} * \text{altura} \quad (49)$$

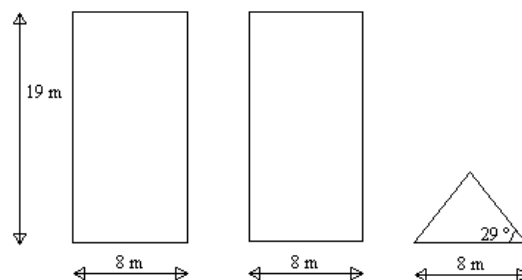


Figura 3.27: Representação da disposição dos resíduos no armazém.

3.8. Análise financeira

O fator mais importante na escolha do sistema a adotar, passa pela análise da viabilidade dos diferentes equipamentos. Isto inclui não só os custos iniciais, mas também os custos e lucros ao longo do tempo, e o mais importante ainda, em quanto tempo o investimento é pago. Através da Tabela 3.11, é possível observar os custos de investimento e operação dos diferentes equipamentos.

Tabela 3.11: Valores de CAPEX e OPEX para os diferentes componentes.

Equipamento	CAPEX (€)	OPEX (€/ano)
Secador - STELA	558 500	27 295
Secador - TEMA	934 950	47 197
Caldeira	142 400	14 240
Tubagens - STELA	60 295	482,5
Tubagens - TEMA	52 135	417
Bomba de circulação - STELA	1 984	39,68
Bomba de circulação- TEMA	1 555	31,10
Campo coletores 1	688 566	6 886
Campo coletores 2	1 235 888	12 359
Campo coletores 3	1 915 626	19 156

Relativamente ao campo de coletores, foi encontrado que para os coletores cilindro parabólicos os custos de OPEX correspondiam a 0,5% do CAPEX [59]. Outra referência [22], indica que o valor de OPEX corresponde a 2% do CAPEX. Uma vez que estes valores não correspondem aos coletores utilizados, foi assumido um valor de 1% do CAPEX, para que os custos estejam próximos dos reais, independentemente se o valor for 0,5% ou 2%. Para o CAPEX, foram encontrados vários valores para diferentes campos instalados na Suíça com a tecnologia em estudo [60]. Estes valores, mostraram um decréscimo de custo unitário com o aumento da área de coletores. Sendo assim usou-se o custo do campo que tinha um tamanho mais próximo do utilizado, com um valor de 478 €/m². De referir que o campo de coletores 1 corresponde à área do descampado, o campo de coletores 2 à área do telhado, e o campo de coletores 3, corresponde à junção das duas áreas.

Para as tubagens foram encontrados valores de OPEX e CAPEX [52]. Para as bombas de circulação através dum catálogo [54], foi possível obter uma bomba que tivesse capacidade para fornecer o caudal necessário, bem como o seu CAPEX. Para o OPEX da bomba, foi utilizado um valor de 5% do CAPEX, igual ao utilizado em [61].

No caso do sistema auxiliar, foi obtido uma proposta com os custos associados. Relativamente ao OPEX, não foi encontrado nenhum dado, pelo que foi assumido um valor de 10% do CAPEX, que é a maior percentagem de OPEX usado.

Para os secadores, os custos estão presente nas propostas fornecidas. Relativamente ao OPEX, a referência [39] indica que pode ir entre 2-11% do CAPEX, e em média varia entre os 5-6% do CAPEX. Sendo assim foi assumido um valor de 5% para OPEX dos secadores.

Para estudar a viabilidade económica do projeto, podemos usar duas equações, que são a TIR (taxa interna de retorno) e o VAL (valor atualizado líquido) do projeto ao longo do tempo. Ambas estão representadas nas equações (50) e (51).

$$VAL = 0 = \text{Investimento inicial} + \sum_{t=1}^n \frac{R_{L,t} - I_t}{(1 + TIR)^t} \quad (50)$$

$$VAL_t [\text{€}] = \sum_{t=1}^n \frac{R_{L,t}}{(1 + r)^t} - \sum_{t=0}^{n-1} \frac{I_t}{(1 + r)^t} \quad (51)$$

Onde:

$R_{L,t}$ Receita líquida no ano t ;

I_t Investimento líquido no ano t ;

t Anos do projeto;

O r na equação (51) corresponde à taxa de atualização. Esta taxa representa o que o dinheiro vale para quem está a investir, sendo que não existe um valor fixo. O Regulamento Delegado (EU) nº 480/2014 da Comissão Europeia, de 3 de março de 2014 [62], utiliza uma taxa de 4 %, pelo que se assumiu o mesmo valor para este projeto.

Para o custo do combustível, através de [63] obteve-se um custo de 0,0278 €/kWh, mas o seu custo pode não ser constante durante o tempo de vida do projeto. Para tal, foi necessário tentar perceber a evolução do preço do combustível ao longo do tempo de vida do projeto. Através de [64], é possível observar que são estimadas diferentes evoluções do preço do gás natural, dependendo das políticas adotadas da região correspondente. Neste caso foi escolhido o cenário da União Europeia com as políticas atuais, sendo que este é o pior cenário da União Europeia. Através desses dados é possível determinar a evolução percentual do combustível em relação ao ano de referência da bibliografia que é 2015. Sendo que foi possível obter o preço do gás natural em 2017 [63], e aplicando a evolução prevista do combustível, foi determinado o custo do gás natural durante o tempo de vida do projeto. Adicionalmente foi determinado que para cada ano de custo estimado, o custo do gás natural poderia variar mais ou menos 10%. Através da Figura 3.28, é possível observar a previsão do custo do gás natural.

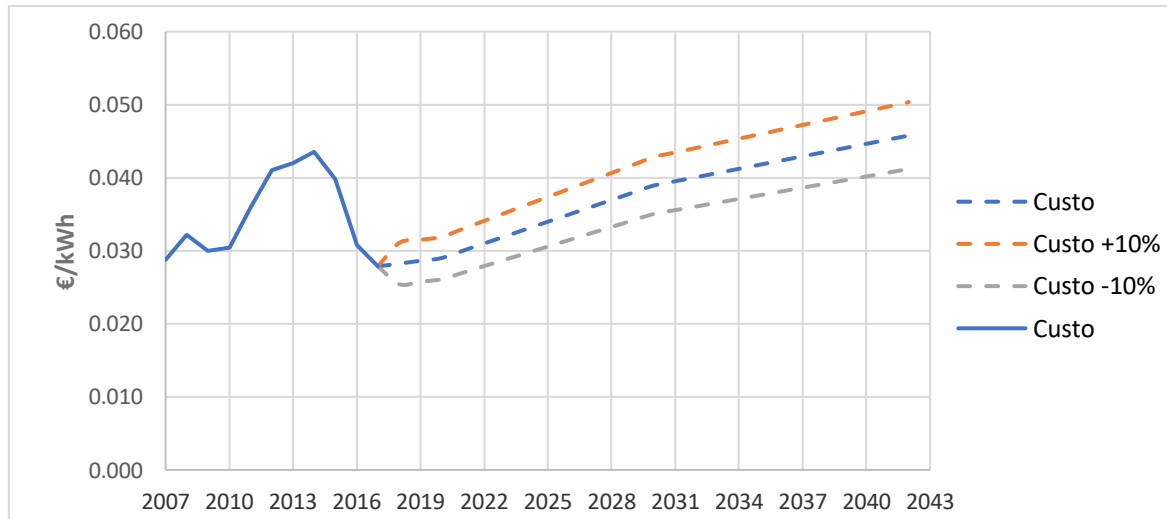


Figura 3.28: Previsão do preço do GN ao longo do tempo.

Para viabilizar o projeto, é necessário obter um retorno financeiro do processo industrial. Ao reduzir a humidade do CDR, para este poder ser vendido a cimenteiras, a um preço que varia com a humidade final do CDR, este deixa de ser depositado em aterro. Sendo que a deposição em aterro tem um custo de 15 €/ tonelada, e se o resíduo deixa de ser depositado, este passa a ser uma despesa evitada.

Atualmente as indústrias cimenteiras não aceitam CDR com humidade superior a 20 %, e abaixo disso o preço seria o mesmo. Num contato posterior com o Eng.º Ivo Dias foi possível obter uma tabela mais completa da variação do preço do CDR com a humidade final. Através da , assumindo que o destinatário paga mais por menores valores de humidade. Tabela 2.1, é possível observar a variação do preço do CDR com a humidade.

Tabela 3.12: Preço de venda do CDR.

Humidade final do CDR	≥ 40 %	≥ 30 %	≥ 20 %	≥ 10 %	< 10 %
Preço (€/ tonelada)	5	5	10	15	17

O estudo foi feito com base na informação inicial, em que seria necessário atingir 20 % de humidade, e não haveria vantagem em descer abaixo desse valor. Mas poderá ser interessante verificar se existe vantagem em baixar a humidade, para além da estipulada inicialmente, assumindo que o destinatário paga mais por menores valores de humidade.

3.9. Cenários simulados

Para estudar a melhor opção, foram simulados diferentes cenários. Nesses cenários foi alterado diferentes equipamentos, como os equipamentos de secagem, campos solares, aproveitamento da energia dos gases de combustão e armazenamento sazonal de CDR. Através da Tabela 3.13, é possível observar de uma forma resumida o que está a entrar em consideração em cada cenário. De referir que CS1 corresponde ao campo solar no descampado, CS2 ao campo solar no telhado, e CS3 à junção dos dois campos solares. As simulações com aproveitamento da energia dos gases de combustão foram feito com os cenários com armazenamento de CDR.

Tabela 3.13: Resumo das variáveis em estudo nas diferentes simulações.

Cenário	STELA	TEMA	Auxiliar	CS1	CS2	CS3	GN	Armz. de CDR
SG0				-	-	-		
SG1	X	-	X	X	-	-	X	-
SG2				-	X	-		
SG3				-	-	X		
TG0				-	-	-		
TG1				X	-	-		
TG2	-	X	X	-	X	-	X	-
TG3				-	-	X		
ASG0				-	-	-		
ASG1	X	-	X	X	-	-	X	X
ASG2				-	X	-		
ASG3				-	-	X		
ATG0				-	-	-		
ATG1				X	-	-		
ATG2	-	X	X	-	X	-	X	X
ATG3				-	-	X		

Capítulo 4 - Resultados

4.1. Avaliação dos secadores

Nesta secção é demonstrado o comportamento dos dois equipamentos ao longo do ano. Através dos resultados apresentados na Figura 4.1, Figura 4.2 e na Figura 4.3, é possível estudar o desempenho dos dois secadores, sendo possível determinar qual o mais eficiente, ou se melhor adapta à situação. O secador STELA é o que consome mais energia com 9377 MWh por ano em comparação com o TEMA que consome 8052 MWh. Também é o secador STELA que seca mais CDR, obtendo como produto final 36923 t/ano em comparação com o TEMA que produz 31820 t/ano. Importa referir que os resultados referem-se ao CDR húmido.

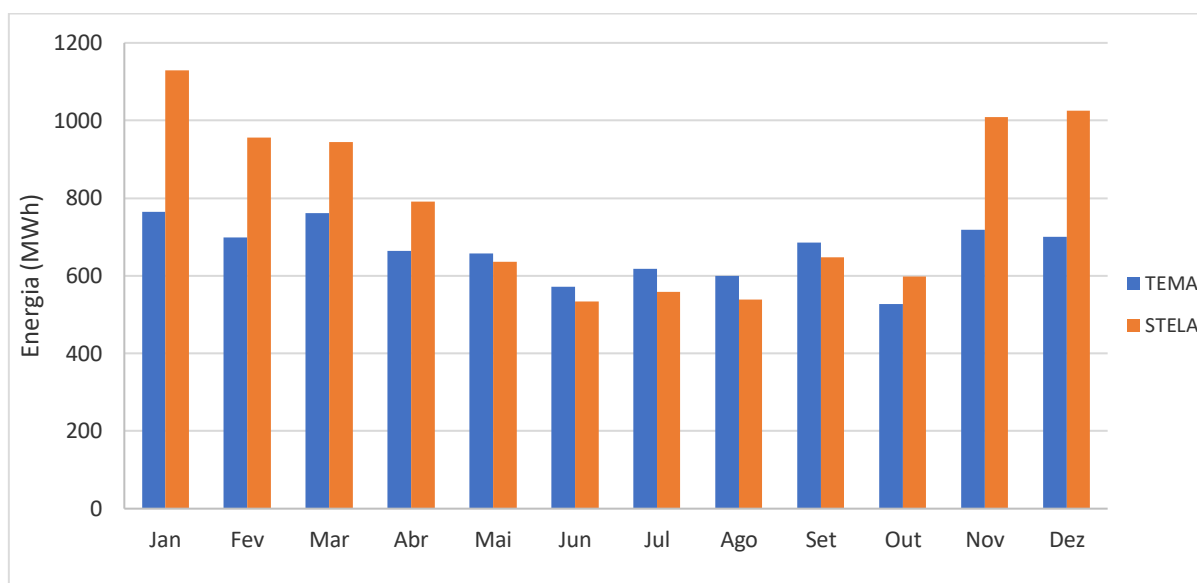


Figura 4.1: Necessidade mensal de energia dos dois equipamentos de secagem.

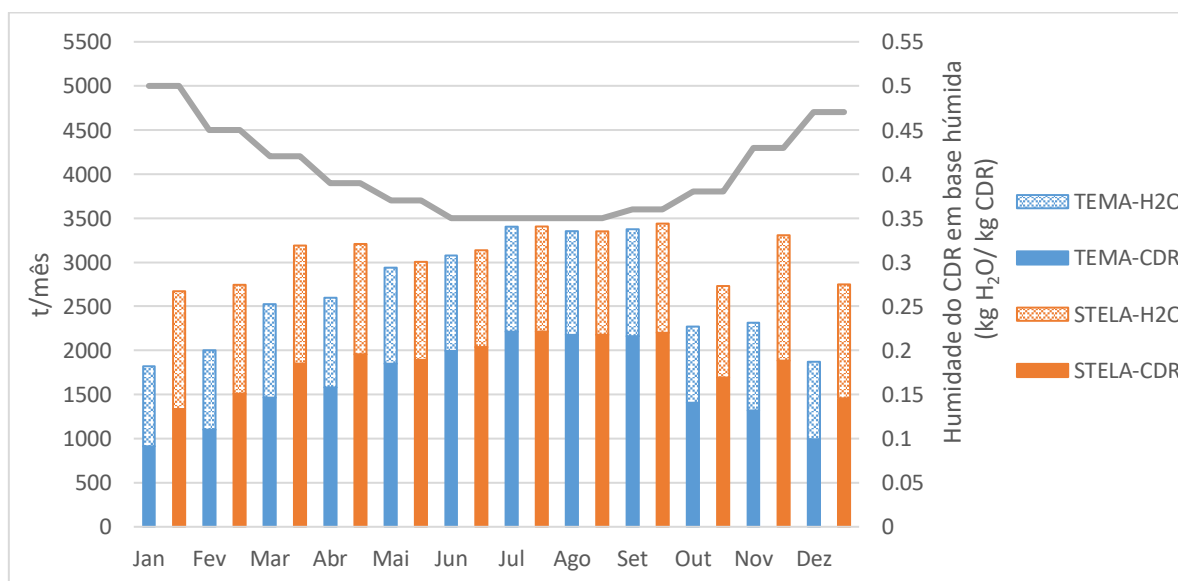


Figura 4.2: Caudal mensal de CDR possível de secar dos equipamentos de secagem.

Na Figura 4.3, é possível observar que o secador TEMA é mais eficiente apenas no mês de janeiro, que é o mês em que o CDR tem mais humidade. Quanto maior for a humidade no CDR, mais energia é gasta para reduzir a humidade. E no caso do secador STELA esse aumento é mais significativo em relação ao secador TEMA.

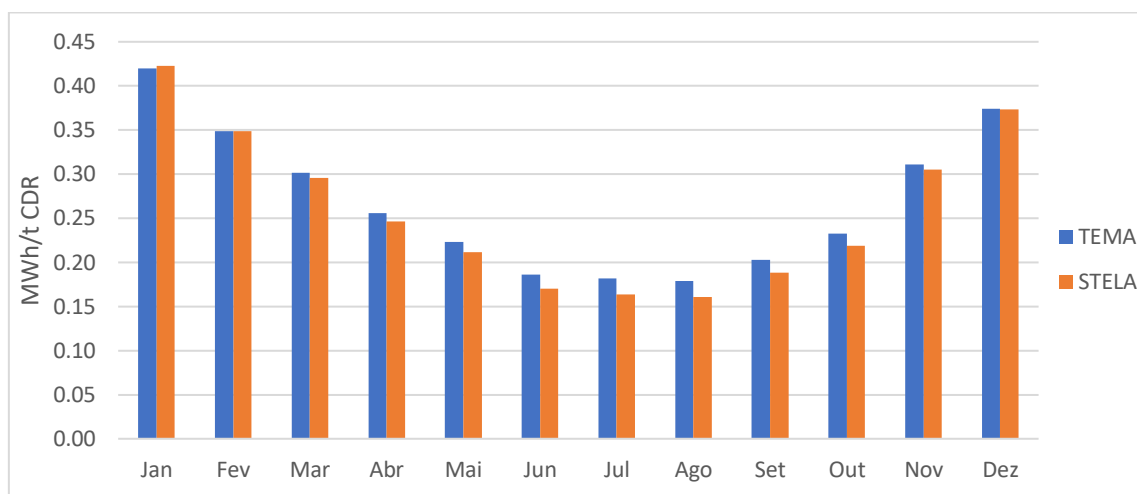


Figura 4.3: Necessidade de energia por unidade de massa para os equipamentos de secagem.

4.2. Avaliação de armazenamento de CDR

As seguintes tabelas servem para comparar a influência que a possibilidade de armazenamento do CDR que não foi seco, tem no desempenho dos dois secadores. Este CDR não foi seco porque o equipamento de secagem, não tem capacidade para colocar a quantidade disponível de CDR com a humidade pretendida.

Sabendo a quantidade de CDR que ficou por secar, e a capacidade de secar para além do CDR disponível, é possível determinar a quantidade que se tem que armazenar para cada secador. Através da Tabela 4.1, é possível observar esses resultados.

Tabela 4.1: Valores referentes ao armazenamento de CDR.

Equipamento	Armazenamento	
	CDR por secar* (t)	Disponível (t)
TEMA	529,1	202,2
STELA	549,8	

* A quantidade de CDR por secar está em base seca.

A Tabela 4.2, é relativa à capacidade de secagem dos 37995 t/ano de CDR húmido para todos os secadores. De referir que relativamente ao armazenamento, foi tido em conta que no caso do secador da STELA, o que não foi seco no Inverno, foi distribuído por 3 meses do verão de forma a não ultrapassar a capacidade do secador, e relativamente ao secador da TEMA, uma vez que este está a maior parte do ano na sua capacidade máxima, foi assumido o caudal máximo possível que o secador teria ao longo do ano. De referir que S/A significa sem armazenamento e C/A com armazenamento.

Tabela 4.2: Quantidade de CDR seco em relação ao CDR disponível.

Equipamento	Quantidade de CDR seco (%)	
	S/A	C/A
TEMA	83,8	86,1
STELA	97,2	100,0

Na Tabela 4.3, pode-se comparar a eficiência média, para as simulações com e sem armazenamento. Sendo que para o secador STELA é necessário 9517 MWh/ ano e para o secador TEMA é necessário 8205 MWh/ ano. De referir que os resultados referem-se ao CDR húmido.

Tabela 4.3: Eficiência das diferentes simulações.

	TEMA		STELA	
	S/A	C/A	S/A	C/A
MWh/ t CDR	0,269		0,259	

4.3. Avaliação dos Combustíveis

Assumindo apenas o uso do sistema auxiliar como fonte de alimentação para ambos os secadores, é possível observar o consumo e emissões do gás natural, do biogás e do biometano para os dois secadores. Uma vez que a produção de biogás existente é uma estimativa, a sua utilização neste trabalho apenas vai ser feita para comparar diferentes combustíveis. Uma análise financeira com a utilização do biogás adicionaria incertezas e possivelmente desviar o valor do projeto do valor real.

Na Tabela 4.4, é possível comparar as características de interesse do biogás, antes e depois do upgrading, que origina o biometano. [65]

Tabela 4.4: Comparação do biogás com o biometano.

	PCI (kJ/kg)	CH ₄ (%*)	CO ₂ (%*)	N ₂ (%*)	H ₂ S (%*)	NH ₃ (%*)
Biogás	12307	45	40	15	0,01	0,0005
Biometano	33225	73	1,35	25	-	-

*Porcentagem volúmica

A Figura 4.4 mostra, de acordo com a GESAMB, a variação da produção estimada de biogás para os próximos 25 anos. Uma vez que os sistemas de recolha de biogás nos aterros têm uma eficiência que pode variar entre os 75 e 85 %, a sua recolha vai ser ainda menor.

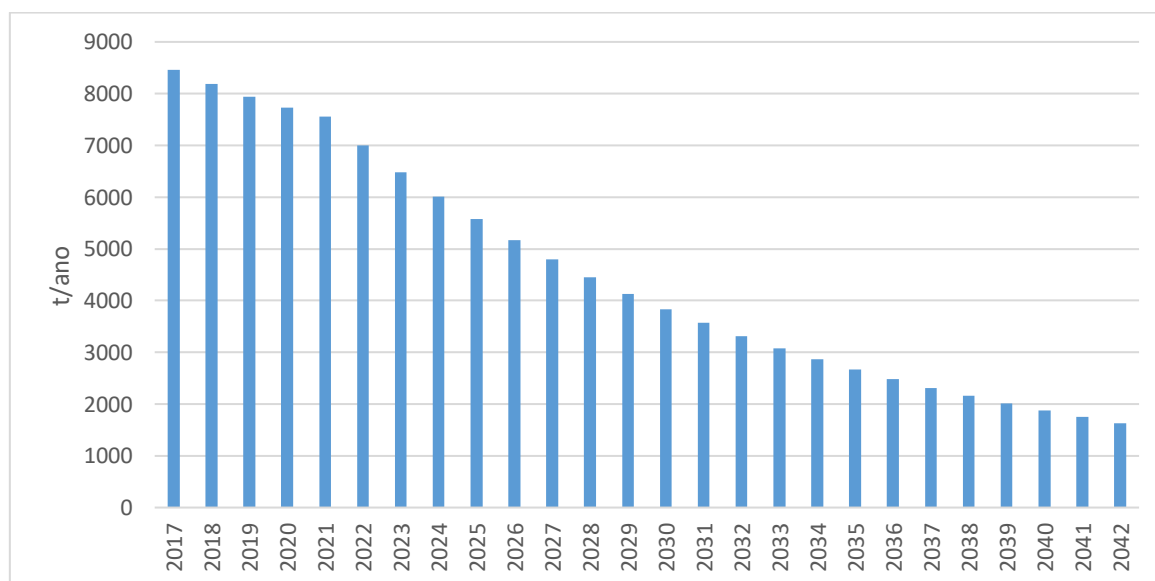


Figura 4.4: Estimativa da evolução da produção de biogás.

Desde a Figura 4.5 até à Figura 4.9 é possível observar o consumo e as emissões dos diferentes combustíveis para os dois secadores. De referir que as emissões relativas ao biogás e biometano, não têm em conta com o Despacho 17313/2008. E os dados foram obtidos, assumindo que existe sempre a disponibilidade do combustível. Tal pode não acontecer no caso do biogás. Referir que os resultados referem-se ao CDR húmido.

Na Figura 4.5, é possível observar que para ambos os secadores, o biogás é o que requer mais quantidades para abastecer o sistema, e o gás natural é o que requer menor quantidade. Por ano, para o secador STELA, é necessário fornecer 3266 t de biogás, ou 1210 t de biometano, ou 823 t de gás natural. Já para o secador TEMA, por ano é necessário fornecer 2804 t de biogás, ou 1039 t de biometano, ou 706 t de gás natural.

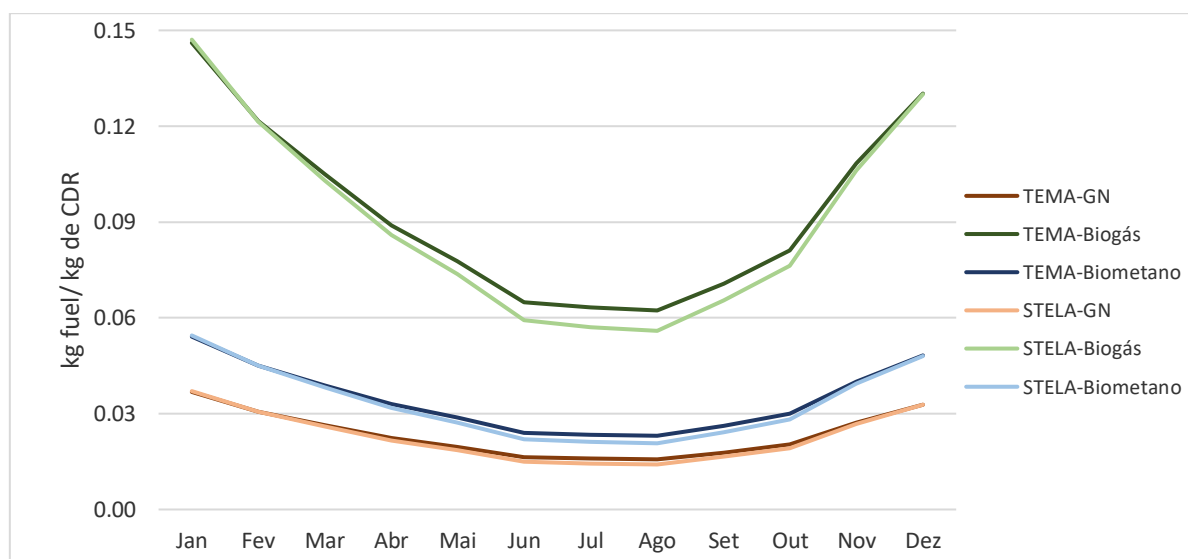


Figura 4.5: Combustível necessário por quantidade de CDR para os equipamentos de secagem.

Na Figura 4.6 é possível observar que na utilização do biogás, o secador TEMA emite mais SO_2 por quantidade de CDR que o secador STELA com exceção do mês de janeiro. Por ano o secador STELA emite 721 kg de SO_2 em comparação com os 619 kg de SO_2 emitidos pelo secador TEMA. O mesmo acontece com as emissões de CO_2 na Figura 4.9. Em relação ao CO_2 , por ano a utilização do biogás no secador STELA emite 5514 t, o biometano 2064 t e o gás natural 2085 t. A utilização do biogás no secador TEMA emite por ano 4735 t, o biometano 1772 t e o gás natural 1790 t. Embora o consumo de gás natural seja menor em relação ao biometano as emissões de CO_2 são superiores, isto porque a quantidade de CO_2 presente no biometano é menor, e não tem compostos como o propano que produzem mais CO_2 em comparação com o metano com a combustão.

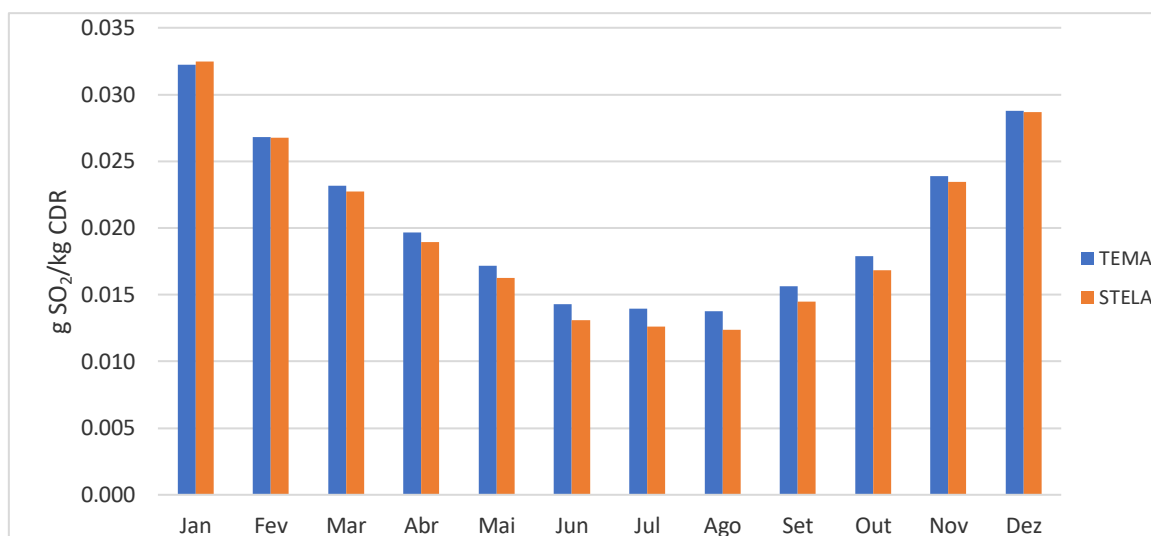


Figura 4.6: Emissões mensais de SO₂ do biogás para ambos os equipamentos de secagem.

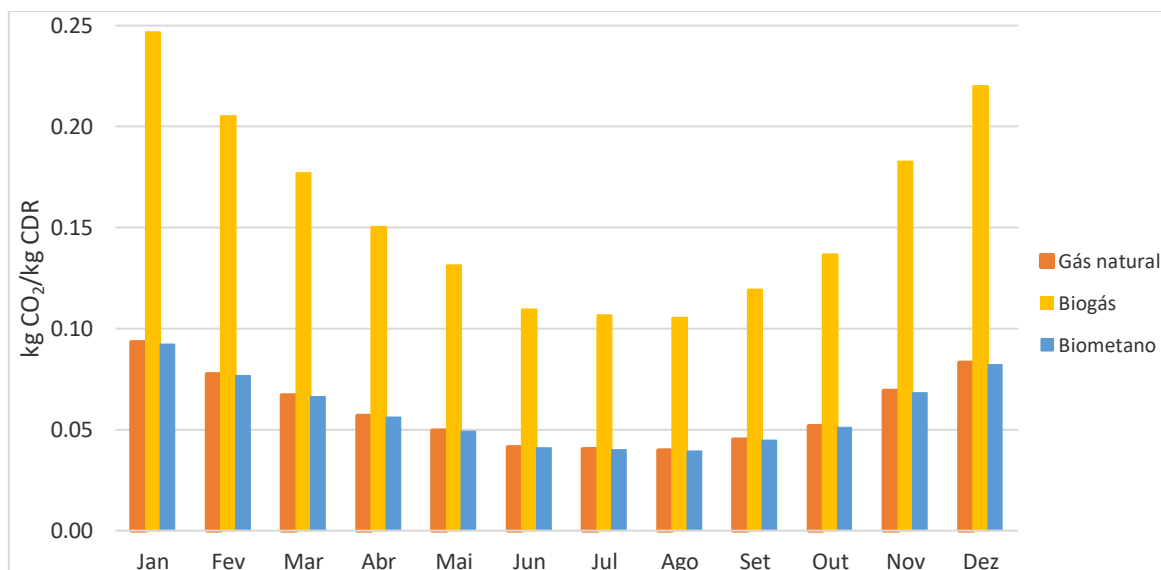


Figura 4.7: Comportamento da quantidade CO₂ emitido por quantidade de CDR para o secador TEMA.

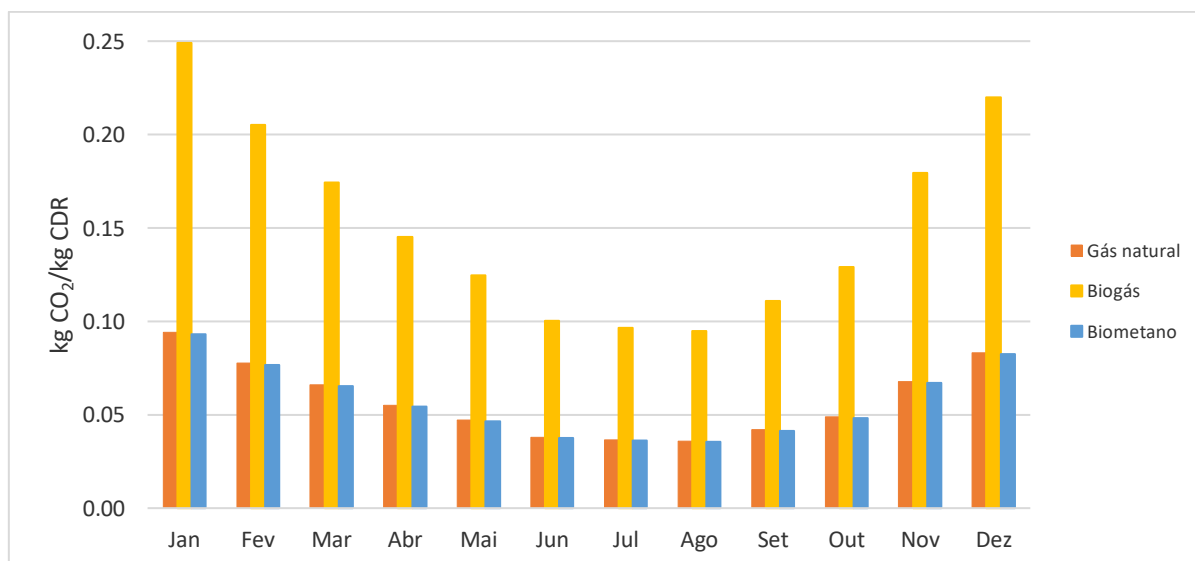
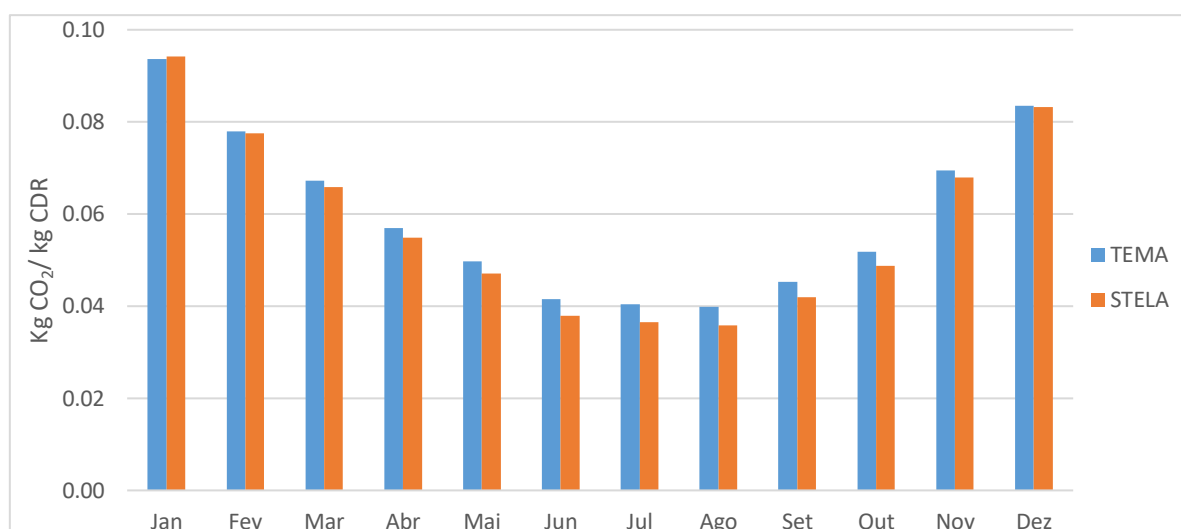


Figura 4.8: Comportamento da quantidade CO₂ emitido por quantidade de CDR para o secador STELA.


 Figura 4.9: Quantidade CO₂ emitido por quantidade de CDR para os dois equipamentos de secagem com o gás natural.

Na Tabela 4.5, é possível compara os indicadores anuais das diferentes simulações.

Tabela 4.5: Indicadores anuais das diferentes simulações.

	TEMA		STELA	
	S/A	C/A	S/A	C/A
kg de fuel/ kg de CDR				
GN		0,024		0,023
Biogás		0,094		0,090
Biometano		0,035		0,033
kg CO₂/ kg CDR				
GN		0,060		0,058
Biogás		0,158		0,152
Biometano		0,059		0,057

4.4. Avaliação dos campos de coletores

Nesta secção, é possível observar a influência dos diferentes campos de coletores nos sistemas de secagem. De referir que o DNI a partir do qual a água começa a circular pelo campo solar e tubagens, é o DNI que permite uma maior poupança no sistema auxiliar, que pode ser observado na Tabela 3.8.

Na Tabela 4.6, apresentam-se alguns dados relativos aos campos de coletores. De referir que o campo de coletores na simulação TG3 e SG3 é o CS3, que corresponde à junção das duas áreas disponíveis. Sendo que no telhado estão 35 séries de 4 coletores em paralelo, e no descampado estão 39 séries de 2 coletores em paralelo.

Tabela 4.6: Dados relativos aos campos de coletores.

	TG0	SG0	TG1	SG1	TG2	SG2	TG3	SG3
Séries em paralelo	-	-	26	39	35		35-39	
Coletores em série	-	-	3	2	4		4-2	
Área de coletores (m ²)	-	-	1439,1		2583		4022	
Área ocupada (%)	-	-	26		29		28	

Na Figura 4.10, é possível observar a influência da utilização dos campos solares no consumo de gás natural. Para o secador STELA o campo solar CS1 permitiu reduzir o consumo de combustível de 823 t/ ano, para 642 t/ ano, o CS2 para 536 t/ ano e o CS3 para 466 t/ ano. Já para o secador TEMA o consumo de 706 t/ ano com o campo solar CS1 foi reduzido para 533 t/ ano, com o CS2 para 418 t/ano e com o CS3 para 354 t/ ano.

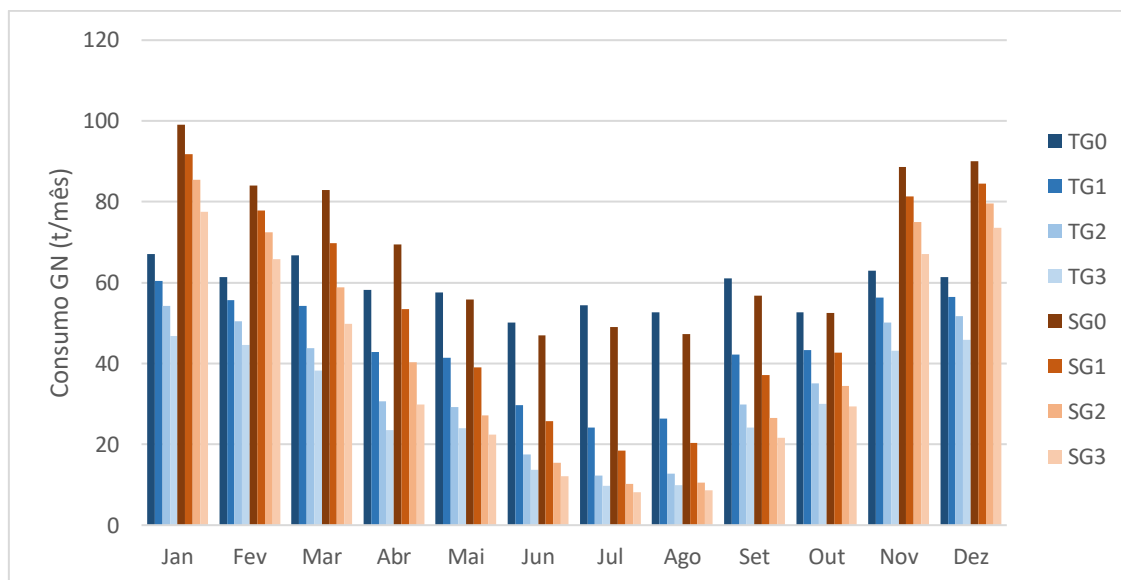


Figura 4.10: Variação mensal do consumo de GN para ambos equipamentos de secagem, sem armazenamento de CDR.

Na Tabela 4.7, é possível observar a expressão que a energia solar tem nos dois sistemas, com e sem armazenamento de CDR, bem como a energia produzida por área. Com o aumento da área há um aumento do fator solar, mas a quantidade de energia produzida por área diminui, isto porque os secadores estão a limitar a temperatura, e uma vez que a temperatura é atingida, a energia produzida não é aproveitada. Com o armazenamento do CDR o fator solar também aumenta, com exceção da simulação TG1 e SG1. Isto porque as perdas do campo solar (CS1) devido ao limite de temperatura são baixas, e a maior da energia adicional é fornecida pelo sistema auxiliar.

Tabela 4.7: Dados anuais referentes ao fator solar dos campos de coletores.

	TG1	TG2	TG3	SG1	SG2	SG3
Sem armazenamento						
Fator solar (%)	26,2	42,2	51,5	22,9	35,7	44,2
kWh/m²	1496,4	1345,5	1069,3	1514,3	1315,4	1051,0
Com armazenamento						
Fator solar (%)	25,7	42,2	51,7	22,6	36,1	44,6
kWh/m²	1450,0	1371,9	1090,7	1517,2	1346,6	1075,9

A Figura 4.11, e a Tabela 4.8, mostram a energia adicional de que o sistema poderia beneficiar, caso a limitação de temperatura devida aos equipamentos de secagem não existisse. É possível verificar que anualmente o campo de coletores associado ao secador STELA tem sempre mais perdas do que associado ao secador TEMA. Isto porque a temperatura de trabalho do secador TEMA é superior à do secador STELA. Na Figura 4.11 é possível observar que é apenas entre Maio e Outubro que o secador STELA tem mais energia não aproveitada que o secador TEMA em relação à energia total produzida pelo campo de coletores. Isso acontece porque nesses meses o secador STELA está a secar uma quantidade de CDR muito abaixo do seu potencial (devido ao baixo teor de humidade no CDR).

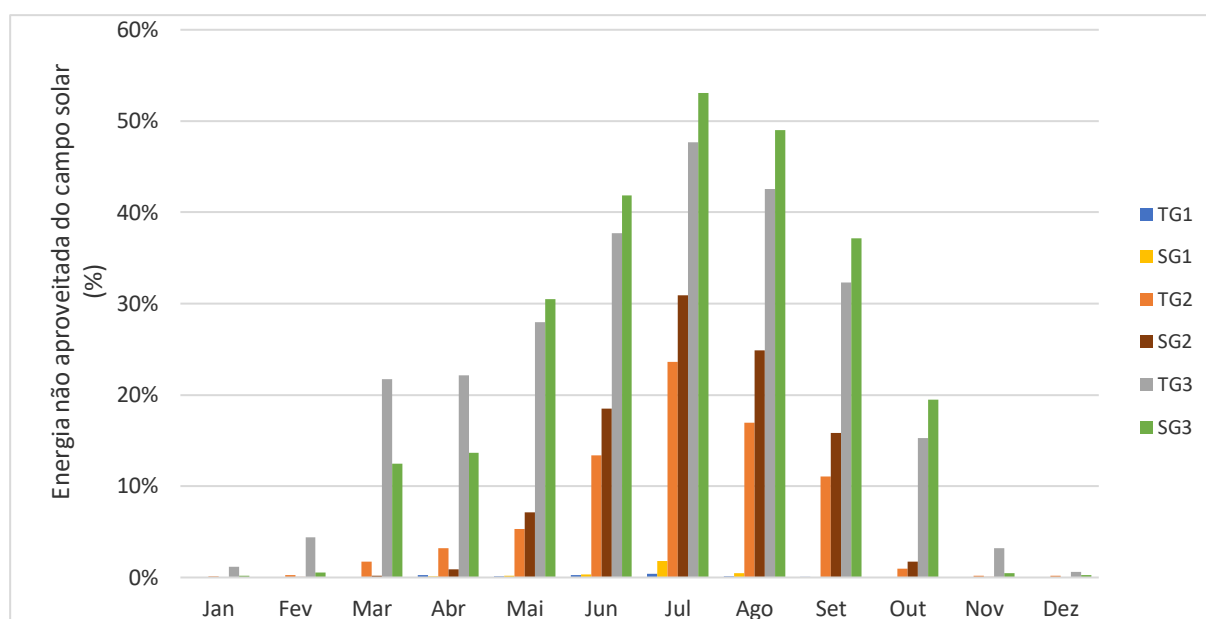


Figura 4.11: Energia não aproveitada pelos sistemas.

Tabela 4.8: Energia anual não aproveitada pelos sistemas

	TG1	TG2	TG3	SG1	SG2	SG3
Sem armazenamento						
Perdas (MWh)	3	395	1780	10	532	1892
Com armazenamento						
Perdas (MWh)	3	327	1695	6	452	1793

Na Figura 4.12, é possível observar a variação da produção de energia útil por área ao longo do ano. Uma vez que nas simulações com armazenamento de CDR, os campos têm um comportamento semelhante em comparação com as simulações sem armazenamento de CDR, a simulação com armazenamento pode ser observada na simulação semelhante sem armazenamento. É possível observar que com o aumento da área a quantidade de energia útil por área diminui. Essa situação é mais visível no meio do ano onde há mais DNI, e onde há mais energia não aproveitada, já referida anteriormente.

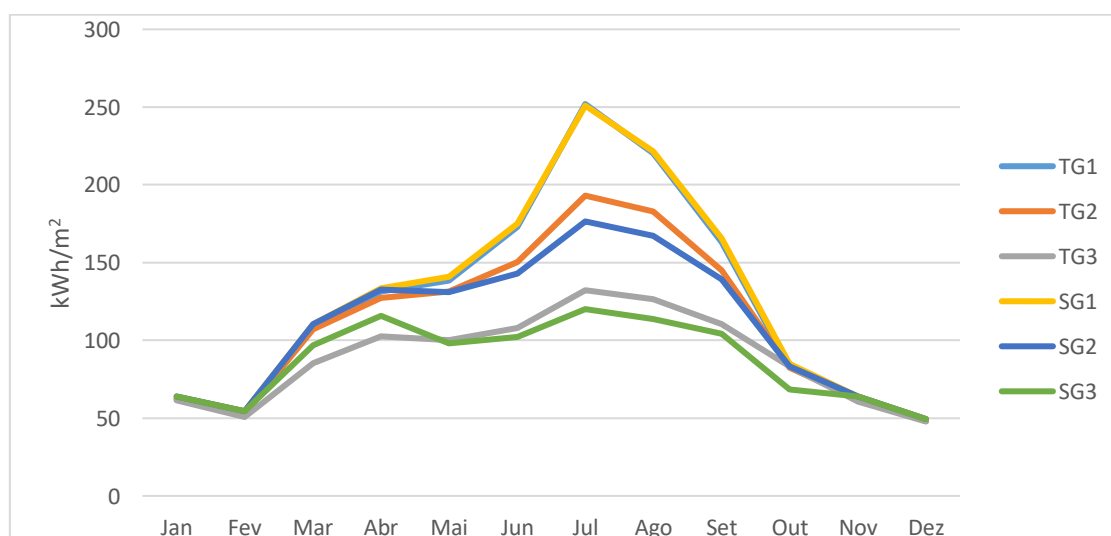


Figura 4.12: Variação da energia útil dos campos solares para ambos equipamentos de secagem, com e sem armazenamento de CDR.

Na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10, é possível observar a influência que os campos solares têm nos diferentes outputs dos dois secadores, com e sem armazenamento de CDR.

Tabela 4.9: Redução do consumo de combustíveis para as diferentes simulações.

	(t/ ano) TG0	Redução (%)			Consumo		Redução (%)	
		TG1	TG2	TG3	(t/ ano) SG0	SG1	SG2	SG3
Sem armazenamento								
GN	706				823			
Biogás	2804	25,5	42,3	51,2	3266	26,3	40,7	49,0
Biometano	1039				1210			
Com armazenamento								
GN	720				835			
Biogás	2857	24,8	41,9	51,2	3314	25,3	40,4	48,9
Biometano	1058				1228			

Tabela 4.10: Redução das emissões de poluentes para as diferentes simulações.

	(t/ ano) TG0	Emissões de CO ₂						
		Redução (%)			(t/ ano)	Redução (%)		
		TG1	TG2	TG3	SG0	SG1	SG2	SG3
Sem armazenamento								
GN	1790				2085			
Biogás	4735	25,5	42,3	51,2	5514	26,3	40,7	49,0
Biometano	1772				2064			
Com armazenamento								
GN	1824				2116			
Biogás	4825	24,8	41,9	51,2	5597	25,3	40,4	48,9
Biometano	1806				2095			
Emissões de SO ₂								
Sem armazenamento								
Biogás	0,619	25,5	42,3	51,2	0,721	26,3	40,7	49,0
Com armazenamento								
Biogás	0,631	24,8	41,9	51,2	0,731	25,3	40,4	48,9

A Figura 4.13 e a Figura 4.14, mostram a temperatura média em cada mês a que a água sai do campo de coletores, sempre que o sistema está em funcionamento.

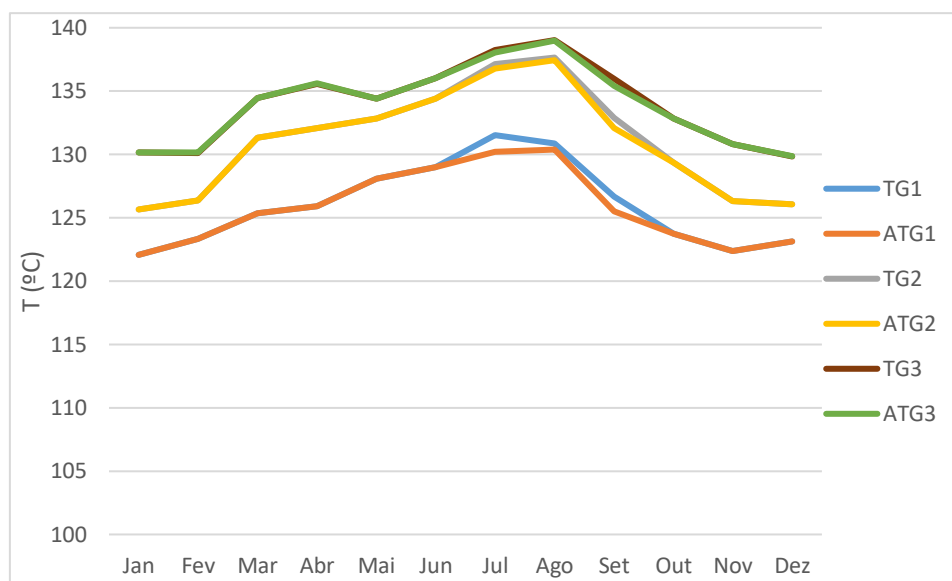


Figura 4.13: Variação da temperatura média de saída dos campos solares, para o equipamento de secagem TEMA.

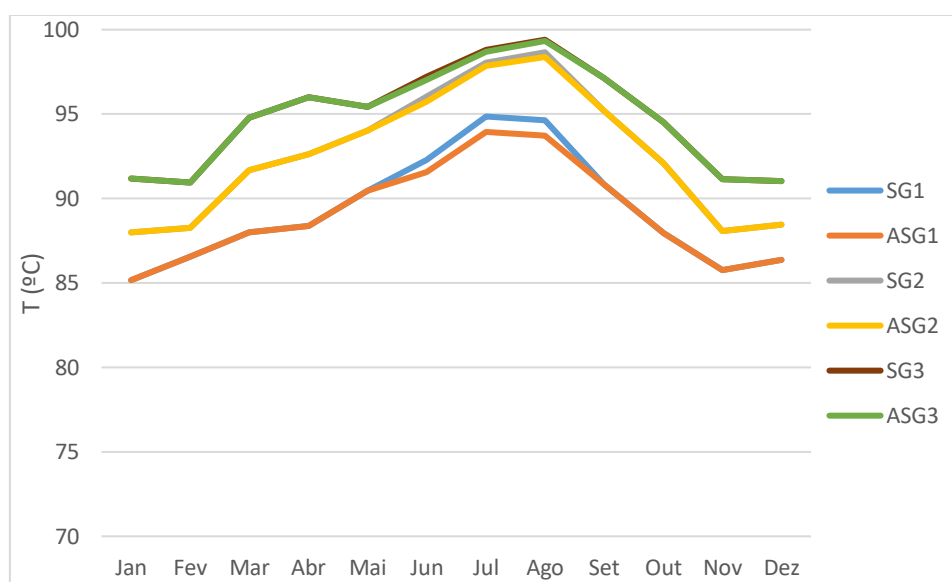


Figura 4.14: Variação da temperatura média de saída dos campos solares, para o equipamento de secagem STELA.

4.5. Circulação de gases de combustão

O CDR seco, não é um produto que precise de uma qualidade estética final. O produto final, apenas tem a finalidade de ser usado como combustível, por isso os produtos resultantes da combustão, não vão ter impacto na qualidade do CDR seco. Ao circular os gases de combustão no ar de secagem antes do permutador, vai permitir que o ar entre a uma temperatura superior à do ambiente, e assim será necessário um caudal de água inferior para aquecer o ar de secagem.

Na Tabela 4.11, é possível observar o consumo de gás natural dos sistemas simulados com armazenamento de CDR, com e sem campo de coletores. É possível observar que com a utilização do campo de coletores, a redução do consumo de GN reduz. Com o aumento do campo de coletores a redução do consumo aumenta de forma menos significativa. Isto porque com o uso do campo de coletores reduz o consumo de GN, e consequentemente as emissões de gases de combustão relativas ao uso do GN.

Tabela 4.11: Consumo anual de gás natural.

	Consumo de GN (t/ano)							
	ATG0	ATG1	ATG2	ATG3	ASG0	ASG1	ASG2	ASG3
Sem circulação de GN (t/ano)	720	546	425	358	835	654	541	469
Com circulação de GN (Redução (%))	4,56	4,60	4,66	4,55	3,05	3,13	3,17	3,18

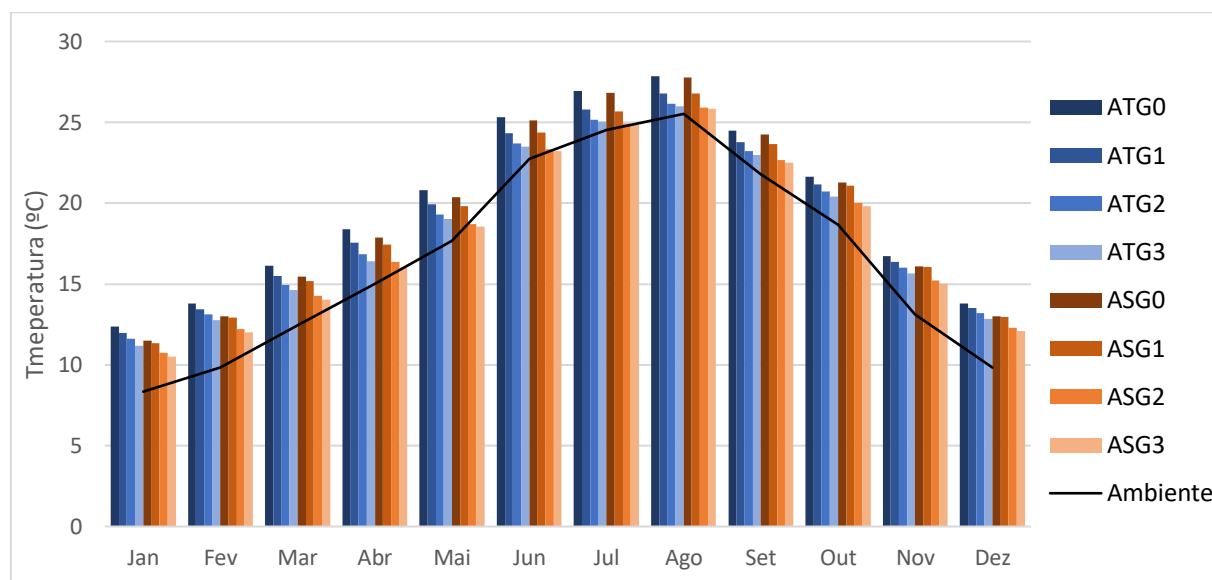


Figura 4.15: Temperatura média de entrada do ar com os gases de combustão no permutador.

4.6. Avaliação financeira

Uma vez que os concentradores solares se degradam com o tempo, estes têm um tempo de vida útil. Para tal foi utilizado um tempo de vida útil para os coletores de 25 anos, isto porque de acordo com [21], vários cilindro-parabólicos foram testados com tempo de vida entre 20 e 30 anos, de acordo com [66], uma instalação de cilindro-parabólico pode durar mais de 30 anos, e [25] indica que uma instalação de CSP pode durar entre 25 e 40 anos.

Nesta secção, são mostrados os vários custos dos diferentes sistemas, bem como indicadores económicos que indicam a viabilidade financeira do projeto. A Tabela 4.12, com os dados da Tabela 3.11, mostra o que cada equipamento representa no investimento, bem como o investimento inicial necessário para cada cenário. De referir que o armazenamento de CDR, não acarreta nenhum custo inicial, pois o espaço já existe, mas tem implicações no consumo de combustível.

Tabela 4.12: Dados relativos ao investimento.

	Parte do investimento (%)					Investimento inicial (M€)
	Secador	Tubagens	Bomba	Sistema auxiliar	Campo solar	
TG0	82,8	4,6	0,1	12,5	-	1,140
TG1	51,6	2,9	0,1	7,8	37,7	1,829
TG2	39,7	2,2	0,1	6,0	52,0	2,376
TG3	30,8	1,7	0,1	4,6	62,8	3,064
SG0	73,2	7,9	0,3	18,7	-	0,763
SG1	38,5	4,2	0,1	9,8	47,4	1,452
SG2	27,9	3,0	0,1	7,1	61,8	1,999
SG3	20,8	2,2	0,1	5,3	71,6	2,688

Na Tabela 4.13, é possível ver a soma das despesas com combustível sobre soma da quantidade de CDR húmido até 2042, para as diferentes simulações com a variação no custo de combustível em 10 % e -10%. Tal como é esperado a utilização do campo de coletores leva a uma redução dos custos associados ao combustível, e quanto maior o campo de coletores, menores são os custos. O armazenamento de CDR para posterior secagem no verão também permite que o investimento de combustível por kg de CDR desça.

Tabela 4.13: Investimento efetivo necessário com combustível por quantidade de CDR húmido desde 2018 até 2042.

Investimento (€/kg CDR)									
Sem armazenamento									
	TG0	TG1	TG2	TG3	SG0	SG1	SG2	SG3	
0%	11,35	8,57	6,71	5,69	11,40	8,90	7,42	6,45	
10%	12,49	9,42	7,38	6,25	12,54	9,79	8,17	7,10	
-10%	10,22	7,71	6,04	5,12	10,26	8,01	6,68	5,81	
Com armazenamento									
0%	11,28	8,56	6,66	5,61	11,31	8,86	7,33	6,36	
10%	12,41	9,41	7,33	6,17	12,44	9,74	8,06	6,99	
-10%	10,15	7,70	5,99	5,05	10,18	7,97	6,59	5,72	

Na Tabela 4.14, é possível observar a receita que a venda de CDR pode criar até 2042. Sendo que no máximo é possível obter 7,111 M€ uma vez que é quando todo o CDR produzido é secado.

Tabela 4.14: Receita efetiva da venda de CDR desde 2018 até 2042.

Venda de CDR (M €)		
	Sem armazenamento	Com armazenamento
TEMA	6,048	6,213
STELA	6,939	7,111

A Tabela 4.15, mostra a relação em percentagem, entre a quantidade de capital que foi gasto com a deposição em aterro e o que foi possível evitar, sendo que no máximo é possível evitar ou gastar 12,4 M€ com a deposição em aterro.

Tabela 4.15: Investimento efetivo necessário para a deposição do resíduo não seco em aterro desde 2018 até 2042.

	Aterro (%)			
	TEMA		STELA	
	Evitado	Deposição	Evitado	Deposição
Sem armazenamento	83,7	16,9	97,2	2,8
Com armazenamento	87,2	12,8	100,0	0

Na Figura 4.16 e na Figura 4.17, é possível observar a variação do VAL para as diferentes simulações, sem variação do preço do combustível. É possível observar que o custo mais elevado do secador TEMA em relação ao secador STELA, têm impacto no valor final do projeto. Embora o secador TEMA tenha um menor investimento de combustível por massa de CDR, o secador STELA permite vender mais CDR seco e tem um custo inicial menor. Já a utilização de campo de coletores, embora aumente o investimento inicial do projeto e o tempo de recuperação do valor investido, no final do tempo de vida do projeto, as simulações com campo solar permitem um retorno mais elevado. Em comparação com os campos soalres, a utilização da área do telhado (TG2 e SG2) são os que apresentam um VAL maior. A utilização de uma área maior (TG3 e SG3), não permite um retorno maior, pois o investimento inicial é mais elevado.

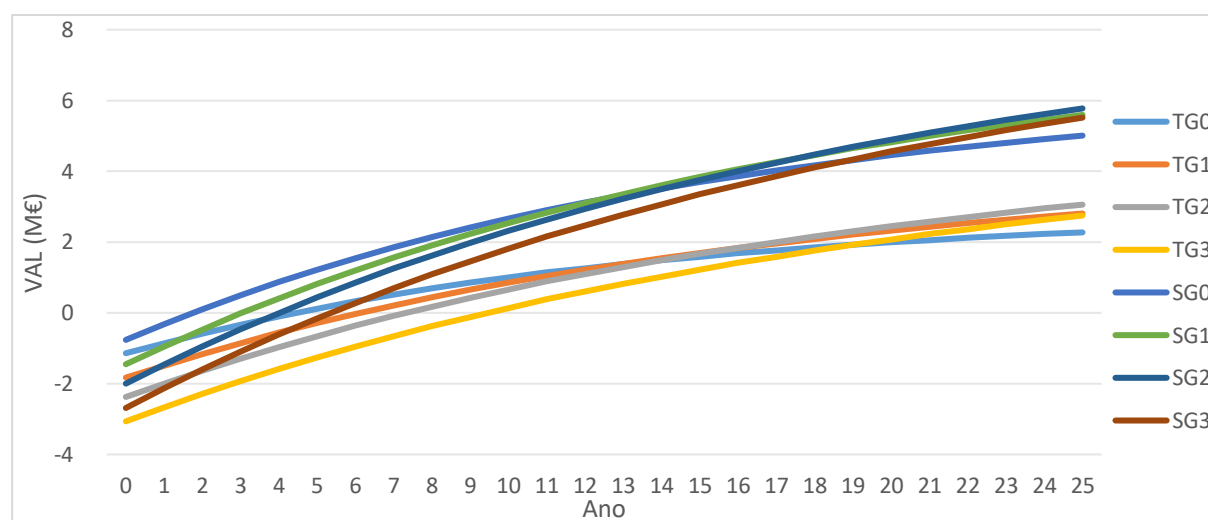


Figura 4.16: Evolução do VAL para as simulações sem armazenamento, com 0% de variação no preço do combustível.

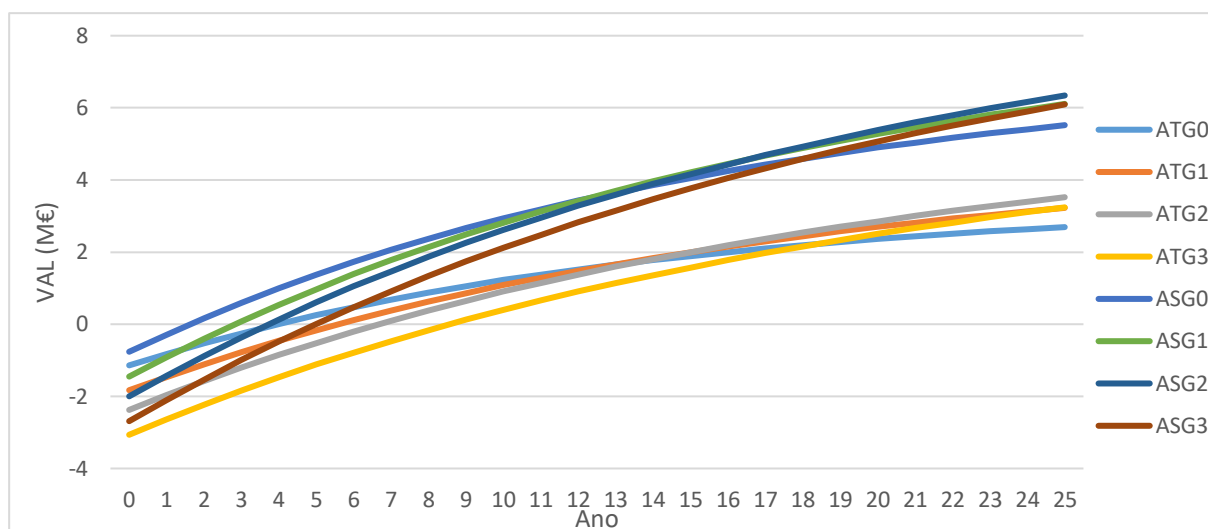


Figura 4.17: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com 0% de variação no preço do combustível.

Uma vez que as simulações com armazenamento são as mais favoráveis, na Figura 4.18 e na Figura 4.19, é mostrado a variação do VAL para com a variação do preço do combustível em 10%, e -10%. É possível observar que com a variação do preço do combustível o VAL altera para todas as simulações. A utilização dos campos solares, permite que o VAL tenha uma variação menor, com a variação do preço dos combustíveis. E quanto maior for a área dos campos solares menor é a variação do VAL. Com o aumento do custo do combustível em 10%, as simulações com campos solares maiores são as que têm o VAL maior, sendo que as simulações que utilizam a área do telhado (TG2 e SG2) continuam a ser as mais interessantes. Com o decréscimo do custo do combustível em 10% TG2 e SG2 continuam a ser mais interessantes, mas a utilização da área do descampado (TG1 e SG1) são mais interessantes em relação à TG3 e SG3.

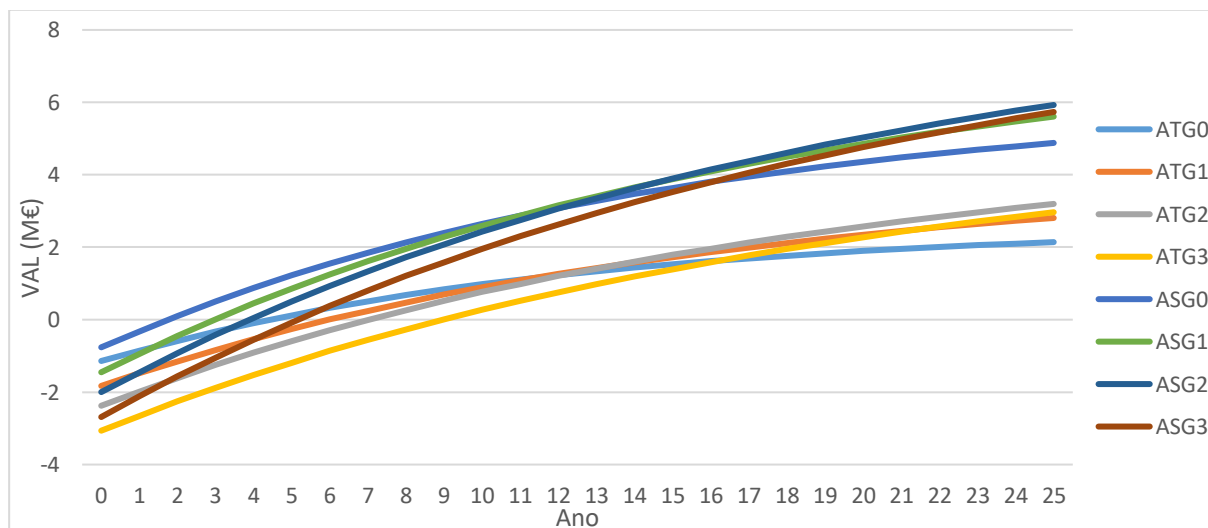


Figura 4.18: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com 10% de variação no preço do combustível.

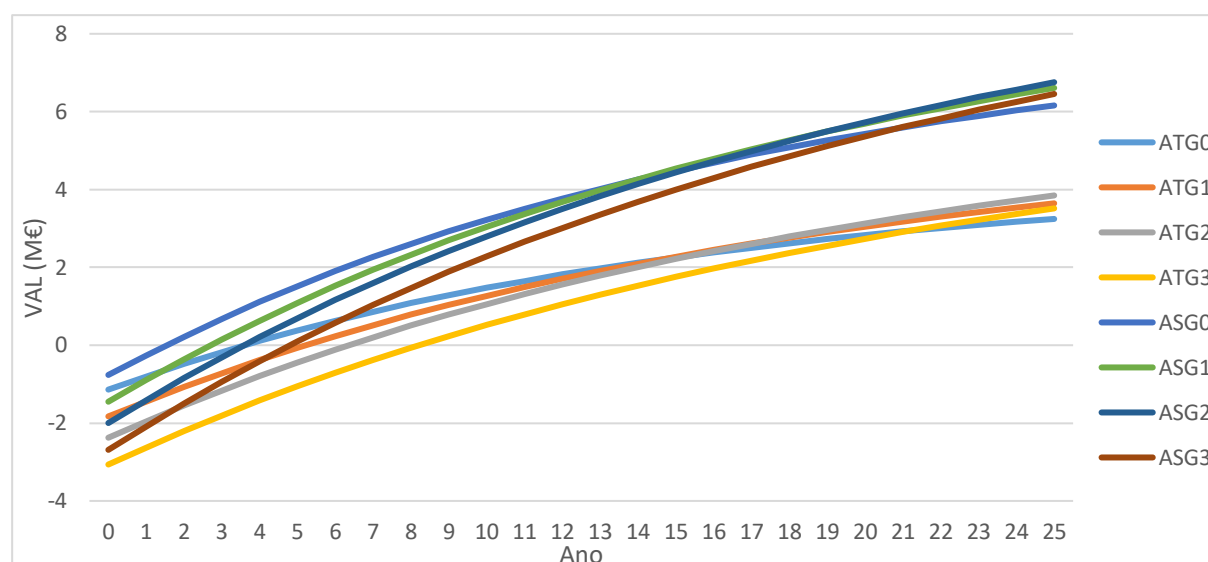


Figura 4.19: Evolução do VAL para as simulações com armazenamento, com -10% de variação no preço do combustível.

Tal como foi referido anteriormente, as soluções com armazenamento são as mais favoráveis. Sendo assim, na Tabela 4.16 é mostrado o valor da TIR de todas as soluções com armazenamento. Contrariamente ao VAL a utilização de campos solares reduz a TIR, isto porque o investimento aumenta e demora mais tempo a obter o valor investido, ou seja, quando o VAL é 0. Tal como acontece com o VAL, a utilização de campos solares permite que a variação do custo de combustível tenha menos impacto na TIR.

Tabela 4.16: Valor da TIR para as diferentes simulações.

Custo GN	TIR (%)							
	ATG0	ATG1	ATG2	ATG3	ASG0	ASG1	ASG2	ASG3
0%	20,4	13,2	9,8	5,1	56,7	31,6	23,3	16,2
10%	17,2	11,4	8,7	4,2	52,4	29,7	22,1	15,3
-10%	23,4	14,8	10,9	6,0	61,0	33,5	24,5	17,0

4.6. Avaliação da utilização dos gases de combustão

De seguida, através da Tabela 4.17 e da Tabela 4.18, é possível observar o impacto financeiro que o aproveitamento energético dos gases de combustão têm nas simulações. As simulações com a circulação dos gases de combustão, foi feita apenas para os cenários onde é armazenado CDR. A Figura 4.20, mostra o aumento da variação média da humidade absoluta do ar que entra no secador, causada pela circulação dos gases de combustão.

Tabela 4.17: VAL sem aproveitamento da energia dos gases de combustão, e acréscimo que o aproveitamento dos gases de combustão têm no VAL.

Custo GN	VAL (M€)							
	Sem circulação dos gases de combustão							
	ATG0	ATG1	ATG2	ATG3	ASG0	ASG1	ASG2	ASG3
0%	2,693	3,227	3,522	3,240	5,520	6,109	6,342	6,095
10%	2,141	2,808	3,196	2,996	4,880	5,608	5,927	5,735
-10%	3,244	3,645	3,847	3,514	6,159	6,610	6,756	6,455
Aumento do VAL com circulação dos gases de combustão (%)								
0%	9,3	6,0	4,3	3,9	3,5	2,6	2,1	1,9
10%	12,9	7,5	5,2	4,6	4,4	3,1	2,4	2,2
-10%	7,0	4,8	3,5	3,2	2,8	2,1	1,7	1,6

Tabela 4.18: Valor da TIR nas simulações com recirculação dos gases de combustão.

Custo GN	TIR (%) com circulação dos gases de combustão							
	ATG0	ATG1	ATG2	ATG3	ASG0	ASG1	ASG2	ASG3
0%	22	14	10	6	58	32	24	16
10%	19	12	9	5	54	30	23	16
-10%	25	15	11	6	62	34	25	17

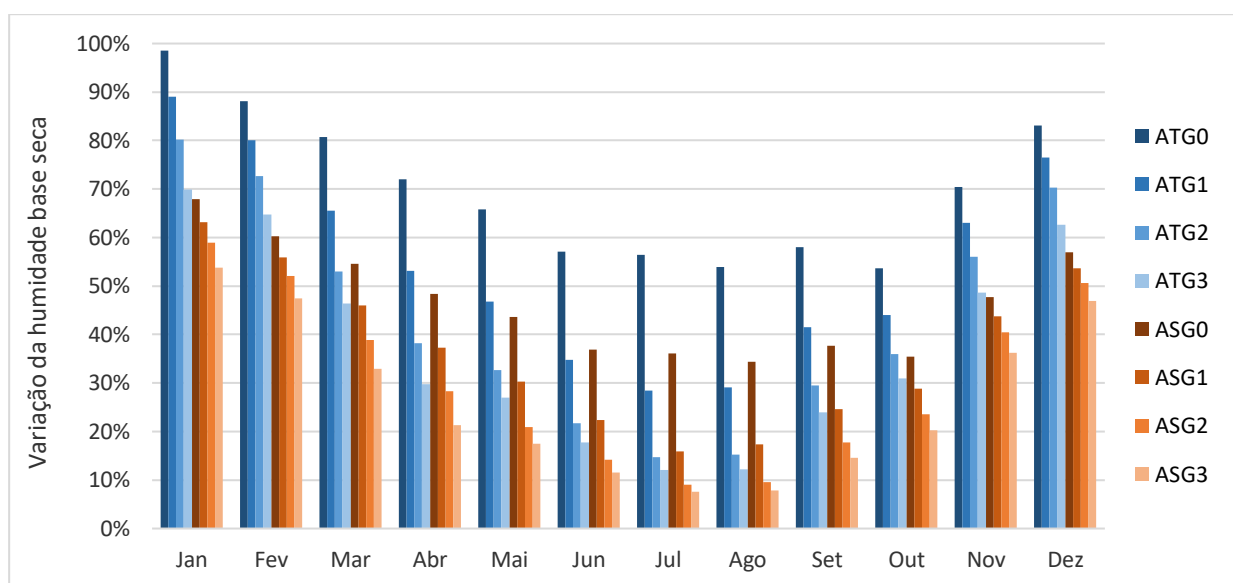


Figura 4.20: Aumento da variação média da humidade (base seca), que entra no secador com fases de combustão.

Capítulo 5 - Discussão

Relativamente ao estudo realizado, existem vários parâmetros que podem ter erro associado, e assim influenciar os resultados. Inicialmente, como já foi referido a humidade atribuída do CDR não é a real, mas sim proveniente de uma informação fornecida, de um outro aterro sanitário, sendo que apenas foi dado em geral quando ocorre o máximo, e o mínimo de humidade, e o comportamento da variação da humidade ao longo do ano, de uma forma muito generalizada. Sendo assim foi atribuído um valor de humidade mensal de forma a representar a informação dada.

Outra informação que pode alterar os resultados relativos ao CDR, são as horas de funcionamento. Em contacto com a GESAMB, foi dito que de todas as horas de trabalho disponíveis, 20% correspondem a paragens por diversas razões. Sendo que as paragens são aleatórias, e não foi possível obter dados sobre anos anteriores, definiu-se que as paragens eram feitas no final do mês de cada ano, sem contar com dias de não trabalho, ou feriados. Isto para que no caso do solar, ou no caso do caudal de CDR a secar, não sejam prejudicados ou beneficiados, com a colocação das horas todas numa estação com CDR mais seco e com mais energia solar, ou com CDR mais húmido e com menos horas solares.

Relativamente ao sistema auxiliar, existe um conjunto de situações que podem ter impacto na avaliação financeira. Para obter informações sobre uma caldeira para os sistemas em estudo, foi necessário entrar em contacto com os fornecedores da tecnologia, para obter a informação necessária para o estudo em questão, uma vez que não foi encontrada toda a informação necessária sobre um equipamento.

De todos os contactos efetuados, apenas um prosseguiu com resposta até se obter uma proposta de uma caldeira. O secador STELA e TEMA trabalham a temperaturas e cargas diferentes, e assim a caldeira para ambos os secadores não tem que ser a mesma, ou seja, um secador pode usar uma caldeira com menor custo. Esta caldeira está sobredimensionada, para qualquer um dos sistemas, o que significa que independentemente do secador a instalar, deverá ser sempre feita uma nova avaliação ao sistema auxiliar a instalar para otimização financeira.

O biogás e o biometano, não foram utilizados neste estudo, porque quer o caudal de biogás produzido em aterro na GESAMB, quer as suas características, são uma incerteza. Isso implicaria um maior desvio no resultado final face ao real. Poderia levar a um projeto muito mais atrativo, o que poderia não corresponder à realidade.

Outra situação seria a implementação de um secador com uso direto dos gases de combustão através de uma câmara de combustão, reduzindo assim as perdas associadas à permuta de calor ar-água. Mas isso pode também ter um impacto negativo, pois o ar vai com mais humidade devido à combustão, e requeria uma integração mais complexa do campo de coletores.

Para a utilização dos gases de combustão no ar de secagem, não foi estudado o efeito do aumento da humidade do ar. Os gases de combustão têm elevados valores de humidade, e ao diluir no ar de secagem, a humidade deste também vai aumentar, dependendo da quantidade de gases de combustão a diluir.

Outra situação que pode alterar a viabilidade financeira do campo de coletores, é a área considerada no telhado. Esta área está disponível para os coletores, e evita a ocupação de espaço que pode ter outra utilidade, mas a utilização requer um estudo sobre a capacidade das estruturas aguentarem com o peso adicional dos coletores, e forças de vento que possam estar implicadas. Adicionalmente, o telhado não é plano, o que pode requerer investimento adicional. Esta situação é possível, pois existe empresas com coletores específicos para estas situações, embora os coletores em estudo não sejam.

O ideal seria utilizar outros coletores cilindro-parabólicos. Tal não foi possível, porque os dados exigidos pelo *type* usado no TRNSYS, não estão disponíveis, e das empresas contatadas nenhuma se mostrou disponível para fornecer informação tão importante, mas que sem ela não é possível fazer o estudo. Os dados do coletor em estudo foram obtidos de uma certificação feita pelo próprio fornecedor, e que pode ser consultada por qualquer pessoa.

A utilização de outra tecnologia de concentração solar também foi posta em causa, sendo os coletores lineares de Fresnel a mais similar com os cilindro-parabólicos. Neste caso existiam alguns problemas para o estudo com esta tecnologia. Um deles é que a versão do software TRNSYS usado, não tinha nenhum *type* para o Fresnel, ou seja, teria de ser estudado se seria possível usar o *type* dos cilindro-parabólicos, ou então teria de ser usado um conjunto de equações que simulassem o comportamento dos coletores Fresnel. Por fim, verifica-se que, mais uma vez, é necessária informação técnica, que mostre o funcionamento do coletor, e tal não foi possível obter.

Relativamente ao coletor usado, os custos por área foram obtidos de outro projeto. Através de todos os projetos que utilizaram esta tecnologia, é possível observar que os custos por área decrescem com o aumento da área implementada. Não foi possível arranjar uma correlação dos custos com a área implementada, pelo que foi assumido o custo por área do projeto com mais área implementada, que corresponde ao menor custo por m². Isto quer dizer, que os custos relativos à implementação de coletores, podem baixar, e consequentemente, os custos de operação e manutenção que estão associados ao investimento também baixam. Caso tal aconteça-se, a implementação do campo de coletores, seria mais atrativo.

Ainda relativamente aos coletores cilindro-parabólicos, não foi tido em conta a perda de eficiência com o passar dos anos, embora a perda de eficiência seja baixa, isso contribui para que a energia produzida pelo campo seja menor, sendo necessário mais combustível. Outra tecnologia que pode ser usada é a tecnologia com menor concentração solar, como por exemplo os CPC. No caso do secador STELA, como a temperatura necessária é baixa, até os coletores planos podem ser usados, e uma vez que são mais leves e necessitam menos espaço, podem ter menos impacto na estrutura do telhado, e podem ter mais área de coletor, pela área disponível.

Para o armazenamento do CDR, os dados relativos às características do CDR não são específicos para o resíduo em questão, mas valores gerais de outras bibliografias. Como já foi referido, até a disposição do CDR no armazém influencia a quantidade possível de armazenar. Sendo que, as quantidades disponíveis para secar não estão longe da quantidade secada com os dados utilizados, não será difícil armazenar a quantidade restante de CDR. Sendo possível armazenar mais CDR, também pode ser vantajoso descentralizar a secagem do CDR do Inverno para o Verão. Tal pode acontecer com o secador STELA, que não atinge a capacidade máxima de Verão, com a secagem do CDR que não foi possível secar no Inverno, mas o mesmo não se sucede para o secador da TEMA. Como o CDR no Verão está mais seco, poder-se á obter uma melhor eficiência do secador, consumindo assim menos combustível.

Capítulo 6 - Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

No caso do armazenamento de CDR, não é viável armazenar CDR seco nas instalações existentes, isto porque mesmo durante o Verão, a humidade do ar é superior à humidade do CDR seco. Ao secar o CDR e armazenar, vai fazer com que o CDR seco volte a ganhar humidade uma vez que o local de armazenamento não é isolado do exterior. Para armazenar CDR seco nas instalações existentes, o tempo de armazenamento tem de ser curto, sendo que na época do Verão por exemplo o tempo de armazenamento pode ser superior, em comparação com o Inverno.

Desde da Figura 4.16 à Figura 4.19, é possível observar que durante o tempo de vida considerado, todas as simulações alcançam um VAL positivo, embora a diferentes ritmos e com valores finais diferentes. É possível observar que, a variação do custo do combustível, poderá ter uma influência significativa no VAL final em todas as simulações. O aumento da área de coletores não implica um benefício financeiro maior. A área de coletores no telhado, é a que mais beneficia o sistema financeiramente, sendo a simulação com o secador STELA a que apresenta um melhor VAL.

Através da Figura 4.10, Tabela 4.9 e da Tabela 4.10, é possível observar que a implementação de um campo de coletores permite reduzir o consumo de combustível e consequentemente as emissões. Quanto maior for a área, maior é essa redução. Através da Tabela 4.7 é possível observar que o fator solar não aumenta significativamente com o aumento do campo de coletores. Isto porque o aumento da área produziu um aumento mais significativo na energia não aproveitada (Figura 4.11) do que na energia útil. Essa energia não aproveitada está associada ao desfoque dos coletores por atingirem a temperatura máxima do processo. Para utilizar essa energia, seria necessário aumentar o caudal nos coletores, principalmente no Verão, ou aumentar a diferença de temperatura entra a entrada e saída no campo de coletores.

A implementação do campo de coletores, permite reduzir os custos associados ao combustível e assim permite obter melhores resultados mesmo que o custo do combustível aumente. Também é possível verificar, que para ambos os secadores, o campo de coletores implica um investimento inicial maior, mas no final a despesa evitada com combustível compensa esse investimento.

Ao comparar os campos de coletores, no caso secador STELA, o SG2 é o mais vantajoso. Ao armazenar CDR de Inverno e secá-lo no Verão, no caso do secador STELA, ASG2 é o mais vantajoso financeiramente independentemente da previsão do custo do combustível. O mesmo acontece com o secador TEMA em que o ATG2 é o mais vantajoso. Já no caso ASG1/ ASG3 e ATG1/ ATG3 se o custo do combustível se encontrar abaixo ou no nível da previsão, ASG1 e ATG1 são mais vantajosos financeiramente em relação a ASG3 e ATG3.

Através das simulações sem campo de coletores, SG0 e TG0, é possível comparar os dois secadores. Na Figura 4.16 e Figura 4.17, é possível observar que o secador STELA é o que requer menos investimento inicial e no final do tempo de vida, é o que alcança melhores resultados financeiros. Também é possível observar na Figura 4.1, que o secador STELA é o que requer mais energia térmica, mas também é o que consegue secar maiores quantidades de CDR. Na Figura 4.3, é possível observar que o secador STELA tem menos quantidades de energia gasta por quantidade de CDR seco, o que o torna mais eficiente.

Através da Tabela 4.17 e Tabela 4.18, é possível observar que a recirculação dos gases de combustão tem benefícios financeiros para todas as simulações, pois o aproveitamento da sua energia permite a redução no consumo no combustível. Com o aumento da área do campo de coletores o impacto do

aproveitamento da energia dos gases de combustão torna-se menor. Uma vez que é necessário utilizar menos combustível como fonte de energia, há menos produção de gases de combustão.

Para desenvolvimento futuro, pode-se obter um estudo paramétrico relativo ao coeficiente de perdas de convecção das tubagens, de forma a obter resultados com sensibilidade para o caso real. Para o secador STELA, pode ser interessante estudar coletores de menor concentração, ou mesmo coletores planos, uma vez que conseguem atingir a temperatura necessária e são menos dispendiosos. Para os coletores colocados no telhado pode-se estudar, se a infraestrutura existente, pode suportar os coletores pretendidos, ou algum outro tipo de tecnologia de coletores solares.

Capítulo 7 - Referências Bibliográficas

- [1]Relatório síntese de Março de 2017, (2017). Obtido de <http://sgcie.publico.adene.pt/Destaques/Paginas/Relatorio-Sintese-Marco-2017.aspx>. Consultado a 12 de Maio de 2017.
- [2]Direção-Geral de Energia e Geologia (2017). Energia em Portugal. Obtido de <http://www.dgeg.pt/>. Consultado de 10 de Maio de 2017.
- [3]International Renewable Energy Agency–IRENA (2015). Solar Heat for Industrial Processes Technology Brief. Obtido de [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA ET SAP Tech Brief E21 Solar Heat at Industrial 2015.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_ET SAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_at_Industrial_2015.pdf). Consultado a 20 de Agosto de 2016.
- [4]Werner Platzer (2015). Potential studies on solar process heat worldwide. Obtido de <http://task49.iea-shc.org/publications>. Consultado a 31 de Maio de 2016.
- [5]<http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=ten00081&plugin=1>. Consultado a 10 de Maio de 2017.
- [6]Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013. Obtido de <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/260463/details/maximized>. Consultado a 10 de Maio de 2017.
- [7]Solar Payback (2017). Solar heat for industry. Webinar de Março de 2017.
- [8]Despacho n.º 21295/2009. Diário da República n.º 184/2009, Série II. Ministérios do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação.
- [9]Conceição Vieira, Benedita Machado, Nuno Ferraz, José Monteiro, Sofia Roque (2011). Manual de Gestão de Resíduos Industriais. Obtido de http://residuosmenos.aeportugal.pt/Downloads/Manual%20de%20Gest%C3%A3o%20de%20Res%C3%ADduos%20Industriais_v2.pdf. ISBN: 978-972-8702-70-0. Consultado a 12 de Fevereiro de 2016.
- [10]Bandeira, Carla (2010) Avaliação da Estabilidade Biológica de Combustível Derivado de Resíduo. Lisboa, Instituto Superior Técnico: Dissertação de Mestrado.
- [11] Apambiente. Relatório de avaliação PERSU 2020 (2016). Obtido de https://www.apambiente.pt/_zdata/Politic as/Residuos/Residuos_Urbanos/RA_PERSU_2016.pdf. Consultado a 10 de Agosto de 2017.
- [12] Apambiente. PERSU 2020 Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (2014). Obtido de http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioPropostaPERSU_Julho30_v3.pdf. Consultado a 11 de Fevereiro de 2016.
- [13]Joana Rebelo de Vela Bastos (2013). Potencial de Utilização de Resíduos Depositados em Antigas Lixeiras como CDR. Caso de Estudo: Lixeira da Moita. Lisboa, Faculdade Nova de Lisboa: Dissertação de mestrado.
- [14]Inês dos Reis Guerreiro de Carvalho (2011). CDR, um resíduo ou um produto, e a sua viabilidade técnico-económica: Análise do estudo do caso. Lisboa, Faculdade Nova de Lisboa: Dissertação de mestrado.
- [15]Ana Marçal, Inês Mateus, Francisco Silva (2015). Resíduos Urbanos Relatório Anual 2014. Obtido de http://apambiente.pt/_cms/view/page_doc.php?id=1350. Consultado a 10 de Fevereiro de 2016.
- [16]Report on RDF/SRF utilization applications and technical specifications (2011). Obtido de http://energywaste.gr/pdf/D1.2_Report%20on%20RDF-

[SRF%20utilization%20applications%20and%20technical%20specifications.pdf](#). Consultado a 11 de Fevereiro de 2016.

[17]João Miguel Bandeira Costa (2013). Coprocessamento de CDR no processo de produção de cimento Lisboa, Faculdade Nova de Lisboa: Dissertação de mestrado.

[18]Žanis Jesko (2008). Classification of solar collectors. Obtido de http://tf.llu.lv/conference/proceedings2008/Papers/04_Jesko.pdf. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[19]Federico Giovannetti, Pedro Horta (2016). Comparison of process heat collectors with respect to technical and economic conditions. Obtido de <http://task49.iea-shc.org/publications>. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[20]Sven Teske, Janis Leung (2016). Solar Thermal Electricity Global Outlook. Obtido de <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2016/Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016.pdf>. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[21]A. Fernández-García, E. Zarza a, L. Valenzuela a, M. Pérez (2010). Parabolic-trough solar collectors and their applications. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110000675>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[22]Soteris Kalogirou (2003). The potential of solar industrial process heat applications. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261902001769>. Consultado a 30 de Agosto de 2016.

[23]International Energy Agency–IEA (2014) Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling. Obtido de https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Heating_Cooling_Roadmap_2012_WEB.pdf. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[24]Observatoire Méditerranéen de l’Energie (2015). Solar Heat for Industrial Processes (SHIP) State of the art in the Mediterranean region. Obtido de http://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/story/2015-10-14/solar_heat_for_industrital_process_technical_report_state_of_the_art_in_the_mediterranean_region.pdf. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[25]Keith Lovegrove, Wes Stein (2012). Concentrating solar power technology. Obtido de <https://www.elsevier.com/books/concentrating-solar-power-technology/lovegrove/978-1-84569-769-3>. Consultado a 10 de Agosto de 2016.

[26]International Energy Agency–IEA (2014) Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity. Obtido de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-thermal-electricity---2014-edition.html>. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[27]Sarada Kuravi, Jamie Trahan, D. Yogi Goswami, Muhammad M. Rahman, Elias K. Stefanakos (2013). Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128513000026>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[28]Elimar Frank, Franz Mauthner, Stephan Fisher (2015). Overheating prevention and stagnation handling in solar process heat applications. Obtido de <http://task49.iea-shc.org/publications>. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[29]<http://ship-plants.info/solar-thermal-plants-map?country=Portugal>. Consultado a 15 de Setembro de 2016.

[30]Matthias Günther. Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 6, Linear Fresnel Technology. Obtido de <http://www.energy->

science.org/bibliotheque/cours/1361468614Chapter%2006%20Fresnel.pdf. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[31]Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor. Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 5, Parabolic Trough Technology. Obtido de <http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361450193Chapter%2005%20parabolic%20trough.pdf>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[32]Soteris A. Kalogirou (2004). Solar Thermal Collectors and Applications. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[33]Matthias Günther, Reza Shahbzfhar. Advanced CSP Teaching Materials, Chapter 6, Linear Fresnel Technology. Obtido de <http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361450770Chapter%2007%20dish.pdf>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

[34]<https://www.slideshare.net/mchhabra27/parabolic-trough>. Consultado a 31 de Maio de 2016.

[35]Review of alternative pre-treatment equipment (2012). Obtido de <http://www.energywaste.gr/pdf/Deliverable%203.1%20Review%20of%20alternative%20pre-treatment%20equipment.pdf>. Consultado a 12 de Fevereiro de 2016.

[36]Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of Industrial Drying. CRC Press. ISBN: 978-1-4665-9665-8.

[37]Wilhelm, Luther R., Dwayne A. Suter, Gerald H. Brusewitz (2004). Drying and Dehydration. Chapter 10 in Food & Process Engineering Technology, 259-284. St Joseph, Michigan: ASAE. American Society of Agricultural Engineers. (Rev. Aug. 2005.)

[38]Wade A. Amos (1998). Report on Biomass Drying Technology. Obtido de <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>. Consultado a 12 de Fevereiro de 2016.

[39]Hanning Li, Qun Chen (2011). Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: a case study. De http://research.ncl.ac.uk/program/components/pdfs/EPSRC_Thermal_Management_Sheffield_Journal_paper_2_Biomass_Drying_Jan_2011.pdf. Consultado a 12 de Março de 2017.

[40]David Salema, Ruben Alves (2016). Relatório auditoria energética GESAMB. LNEG – Laboratório Nacional da Energia e Geologia.

[41]Theodore L. Bergman, Frank P. Incropera. Fundamentals Heat Mass Transfer 7th edition. John Wiley and Sons, 2011. ISBN 978-0470-50197-9.

[42]<http://www.spf.ch/fileadmin/daten/reportInterface/kollektoren/factsheets/scf1549en.pdf>. Consultado a 10 de Agosto de 2016.

[43]http://www.nep-solar.com/wp-content/uploads/2013/11/NEP-Solar-Polytrough1800_Datasheet.pdf. Consultado a 10 de Agosto de 2016.

[44]John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-470-87366-3.

[45]<http://www.balticbiogasbus.eu/web/about-biogas.aspx>. Consultado a 19 de Novembro de 2016.

[46]S. Rasi, A. Veijanen, J. Rintala (2007). Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206003033>. Consultado a 19 de Novembro de 2016.

[47]Pedro Azevedo (2016). Lecture_EN 02A 20160224, Tecnologias de Combustão.

- [48]E. S. Karapidakis; A. A. Tsavre; P. M. Soupios; Y. A. Katsigiannis (2010). Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills. Obtido de <http://www.bioline.org.br/pdf?st10059>. Consultado a 18 de Novembro de 2016.
- [49]Katie Elizabeth Hannah Warren (2012). A techno-economic comparison of biogas upgrading technologies in Europe. UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ: Tese de mestrado. Obtido de <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/41233/URN:NBN:fi:jyu-201304221478.pdf?sequence=1>. Consultado a 19 de Novembro de 2016.
- [50]Eckhard Weidner (2008). Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Obtido de <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-94887.html>. Consultado a 19 de Novembro de 2016.
- [51]ASHRAE's 2005 handbook (Fundamentals), chapter 36. ISBN 1-931862-70-2.
- [52]<http://geradordeprecos.info/>. Consultado a 13 de Setembro de 2016.
- [53]http://www.industrialinsulation.com/mineral_wool_pipe_insulation.htm. Consultado a 13 de Setembro de 2016.
- [54]Rolo & Pereira LDA (2015). Precário 2015. Obtido de https://cld.pt/dl/download/9863fe1f-7916-4cfc-bb34-5997707aaf25/TABELA_2015_SD.pdf. Consultado a 13 de Setembro de 2016.
- [55] <http://excelcalculations.blogspot.com/2012/12/heat-loss-from-insulated-pipe.html>. Consultado a 16 de Setembro de 2016.
- [56] <https://www.brighthubengineering.com/hvac/92660-natural-convection-heat-transfer-coefficient-estimation-calculations/>. Consultado a 16 de Setembro de 2016.
- [57]M. Chopra, D. Reinhart, M. Vajirkar & B. Koodhathinkal (2006). Stability of slopes of municipal solid waste landfills with co-disposal of biosolids. Obtido de <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/89/16227>. Consultado a 16 de Agosto de 2016.
- [58]A. Gendebien, A. Leavens, K. Blackmore, A. Godley, K. Lewin, K.J. Whiting, R. Davis. (2003) Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives (final report). Obtido de <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf>. Consultado a 10 de Fevereiro de 2016.
- [59]M. Seitz, M. Johnson, S. Hübner (2017). Economic impact of latent heat thermal energy storage systems within direct steam generating solar thermal power plants with parabolic troughs Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417303011>. Consultado a 12 de Março de 2017.
- [60]http://ship-plants.info/solar-thermal-plants?collector_type=5&system_engineering_company=NEP%20Solar%20AG. Consultado a 15 de Setembro de 2016.
- [61]<https://www.usbr.gov/uc/provo/rm/snyderville/pdfs/appdx.pdf>. Consultado a 13 de Janeiro de 2017.
- [62]Regulamento Delegado (EU) n.º 480/2014 da Comissão de 3 de Março de 2014.
- [63]Direção-Geral de Energia e Geologia (2017). Combustíveis Fósseis - Estatísticas Rápidas – fevereiro 2017 Obtido de <http://www.dgeg.pt/>. Consultado de 10 de Maio de 2017.
- [64]International Energy Agency (2016). World Energy Outlook 2016. Obtido de <https://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html>. Consultado a 15 de Maio de 2017.
- [65]Ali Jalalzadeh-Azar, Genevieve Saur, Anthony Lopez (2010). Biogas Resources Characterization. Obtido de https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review10/an005_jalalzadeh_2010_o_web.pdf. Consultado a 19 de Novembro de 2016.

[66]International Renewable Energy Agency-IRENA (2013). Concentrating Solar Power Technology Brief. Obtido de <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E10%20Concentrating%20Solar%20Power.pdf>. Consultado a 1 de Agosto de 2016.

Capítulo 8 - Apêndices

A. Cálculos e resultados adicionais

Tabela 8.1: Resultados do balanço de massa e de energia para as condições nominais.

Secador	TEMA	STELA	TEMA	STELA
CDR	in		out	
$\dot{m}_{CDR\ seco}$ (kg/s)	1,67	1,39	1,67	1,39
w_{bh} (kg/kg CDR)	0,4	0,5	0,2	0,2
w_{CDR} (kg/kg CDR seco)	0,67	1	0,25	0,25
\dot{m}_{H_2O} (kg/s)	1,11	1,39	0,42	0,35
T_{CDR} (°C)	20	16	50	37
Q_{CDR} (kW)	136	122	196	121
Ar				
\dot{m}_{ar} (kg/s)	22,92	50	22,92	50
w_{ar} (kg/kg Ar seco)	0,0027	0,0078	0,0330	0,0286
$\dot{m}_{w\ ar}$ (kg/s)	0,06	0,39	0,76	1,43
T_{ar} (°C)	129	90	52	39
Q_{ar} (kW)	2993	4592	1280	2088
			1654	2514
Permutador				
Ar				
\dot{m}_{ar} (kg/s)	22,92	50	22,92	50
w_{ar} (kg/kg Ar seco)	0,0023	0,0078	0,0027	0,0078
$\dot{m}_{w\ ar}$ (kg/s)	0,06	0,39	0,06	0,39
T_{ar} (°C)	5	16	129	90
Q_{ar} (kW)	116	816	2993	4592
Água				
\dot{m}_{H_2O} (kg/s)	17,18	30,06	17,18	30,06
T_{H_2O} (°C)	140	100	100	70
Q_{H_2O} (kW)	10071	12587	7193	8811

As seguintes equações, são as utilizadas pelo type 536, relativo ao funcionamento dos coletores.

$$F'U_L = \begin{cases} F_R U_L & \text{if } \frac{F_R U_L}{g_{test} * C_{p\ H_2O} * C} \geq 1 \\ g_{test} * cp \left(1 - e^{\left(\frac{F_R U_L}{g_{test} * C_{p\ H_2O} * C} \right)} \right) & \text{if } \frac{F_R U_L}{g_{test} * C_{p\ H_2O} * C} < 1 \end{cases}$$

$$Q_c = A_c (F_R (\tau \alpha)_n * I_t - F_R U_L * \Delta T)$$

$$R_{test} = g_{test} * C_{p\ H_2O} * \left(1 - e^{\left(\frac{F'U_L}{g_{test} * C_{p\ H_2O} * C} \right)} \right)$$

$$R_1 = \frac{N_{série} * \dot{m} * C_{p_{H_2O}}}{A_{abertura}} * \left(\frac{1 - e^{((-F'U_L * A_{abertura}) / (N_{série} * \dot{m} * C_p))}}{R_{test}} \right)$$

$$R_2 = \frac{1 - \left(1 - \frac{R_1 * A_{abertura} * F_R U_L}{\dot{m} * C_{p_{H_2O}} * N_{série} * C} \right)^{N_{série}}}{N_{série} \left(\frac{R_1 * A_{abertura} * F_R U_L}{\dot{m} * C_{p_{H_2O}} * N_{série} * C} \right)}$$

$$Q_c = R_1 * R_2 * A_{abertura} * N_{paralelo} \left(F_R (\tau\alpha)_n * IAM * DNI - \frac{F_R U_L}{C} (T_{in} - T_{amb}) \right)$$

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q_c}{\dot{m} * C_{p_{H_2O}}}$$

$$T_{out} = T_{amb} * F_R (\tau\alpha)_n * IAM * DNI * \frac{C}{F_R U_L}$$

$$Q_{desp} = \dot{m} * C_{p_{H_2O}} * (T_{out} - T_{max})$$

As seguintes equações foram utilizadas para o balanço de massa nos secadores.

$$PartedoCDRnototal(\%) = \frac{Produçãoanualestimada\ de\ CDR}{Total\ de\ resíduos\ recebidos} * 100$$

$$Total\ de\ CDR\ por\ mês\ (t) = Total\ de\ resíduos\ do\ mês\ (t) * parte\ do\ CDR\ no\ total$$

$$Água\ a\ retirar\ \left(\frac{kg}{h} \right) = \dot{m}_{CDR\ seco} * W_{CDR} - \left(\dot{m}_{CDR\ seco} \left(\frac{HR\ final}{1 - HR\ final} \right) \right)$$

$$\dot{m}_{CDR} \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{Total\ de\ CDR\ do\ mês\ (t)}{Horas\ de\ trabalho\ do\ mês} * 1000$$

B. CDR

Tabela 8.2: Sistema de classificação para o CDR (NP 4486:2008).

Parâmetro	Medida estatística	Unidades	Classes				
			1	2	3	4	5
Poder calorífico inferior (PCI)	Média	MJ/kg (t.q.)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Teor de Cloro (Cl)	Média	% (base seca)	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Teor de Mercúrio (Hg)	Mediana	mg/MJ (t.q.)	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	Percentil 80	mg/MJ (t.q.)	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,00$

Tabela 8.3: Enquadramento Geral relativo à produção e utilização de CDR.

Operação e gestão de resíduos		Classificação da operação	Código de atividade económica (CAE)	Regime legal aplicável				
				DL 178/2006 Regime Geral da Gestão de Resíduos	DL 85/2005 Incineração e co-incineração de resíduos	DL 173/2008 Prevenção e controlo Integrados da Poluição (PCIP)	Proposta diretiva emissões industriais (reformulação PCIP)	DL 197/2005 Avaliação de Impacte Ambiental (AIA)
Produção de CDR			38322	Art. 32º Licenciamento simplificado	n.a.	n.a.	Sim, se pré tratamento de resíduos para co-incineração e capacidade > 50 t/d	n.a.
Incineração dedicada de CDR	Em instalação de incineração de RU	D10	38212	Art. 43º Regimes especiais de licenciamento	Sim	Sim, se capacidade > 3 t/h	Sim, se capacidade > 3 t/h	Sim, se capacidade > 100 t/d
		R1 ¹	35112					
	Em outras instalações R12	D10	38212	Art. 43º Regimes especiais de licenciamento	Sim	n.a.	Sim, se capacidade > 3 t/h	Sim, se capacidade > 100 t/d
Co-incineração de CDR	CDR como único combustível alternativo	R1	Classificação da atividade (ex. indústrias transformadoras)	Art. 32º licenciamento simplificado	Sim, cumprimento de requisitos técnicos	n.a.	n.a. Prevê-se possível abrangência	n.a.
	CDR e outros resíduos como combustíveis alternativos	R1	Classificação da atividade (ex. indústrias transformadoras)	Art. 43º Regimes especiais de Licenciamento	Sim	n.a.	n.a. Prevê-se possível abrangência	n.a.
	Em centrais de biomassa (sendo CDR o único resíduo)	R1	38212	Art. 32º Licenciamento simplificado	Sim, cumprimento de requisitos técnicos	n.a.	n.a. Prevê-se possível abrangência	n.a.

¹ Diretiva 2008/98/CE (DQR), se cumprido requisito de eficiência energética.

Adaptado a partir de: Despacho n.º 21295/2009